

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

ERICK JUNIOR DE SOUZA
GUILHERME DA CUNHA GOMES

**Estudo dos métodos de recorte e furação de perfis metálicos utilizados na construção
civil**

Guaratinguetá

2023

Erick Junior de Souza

Guilherme da Cunha Gomes

Estudo dos métodos de recorte e furação de perfis metálicos utilizados na construção civil

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia civil.

Orientador (a): Olivia Martins Ferreira Correa

Coorientador (a): Prof. Dr. Paulo Valladares Soares

Guaratinguetá

2023

S729e	Souza, Erick Junior de Estudo dos métodos de recorte e furação de perfis metálicos utilizados na construção civil / Erick Junior de Souza ; Guilherme da Cunha Gomes - Guaratinguetá, 2023. 107 f : il. Bibliografia: f. 100-107 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientadora: Olivia Martins Ferreira Correa Coorientador: Prof. Dr. Paulo Valladares Soares 1. Estruturas metálicas. 2. Análise estrutural (Engenharia). 3. Construção sustentável. I. Gomes, Guilherme da Cunha. II. Título. CDU 624.04
-------	--

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO(A) EM NOME DO CURSO”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof.^a Isabel Cristina de Barros Trannin
Coordenadora do curso de Eng. Civil

BANCA EXAMINADORA:



Eng.^a OLIVIA MARTINS FERREIRA CORREA

Orientador(a)



Prof. Dr. PAULO VALLADARES SOARES

UNESP-FEG



Prof. VICTOR ARRUDA FERRAZ DE CAMPOS

UNESP-FEG

Janeiro de 2023

Este trabalho é dedicado aos nossos familiares e a república Masmorra que nos hospedou e se tornou parte da nossa família durante os anos de faculdade além de todos aqueles que nos apoiaram e participaram do nosso processo de aprendizagem e amadurecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos demasiadamente o conhecimento e suporte da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, em especial agradecemos ao professor de estruturas Douglas Andrini Edmundo e aos nossos orientadores por nos acompanharem neste estudo. Gostaríamos de agradecer as empresas que colaboraram com o fornecimento de dados e respostas aos nossos questionamentos.

RESUMO

A busca por sistemas construtivos rápidos e menos agressivos para o ambiente vem se tornando cada vez mais comum no Brasil, em função desta perspectiva, o uso de estruturas metálicas, que é uma alternativa plausível, por ser um sistema construtivo que promove racionalização da matéria prima e de mão de obra para execução, maior que o sistema de concreto armado, será um dos focos deste trabalho. Considerando o fato de que a construção civil altera a natureza toda vez que realiza algum tipo de obra, seja por meio de novas construções, ou de reformas, gerando resíduos ou ainda para a extração dos recursos naturais necessários para a execução destas, serão feitas análises, dos métodos de recorte e furação de perfis metálicos, para colocar em comparativo determinados parâmetros visando apontar qual o método com menor impacto ambiental, maior produtividade e de melhor custo benefício para as situações analisadas. Essa análise será realizada por meio de pesquisas teóricas em literatura acadêmica além da pesquisa de mercado, por meio de um questionário enviado a empresas do setor. Neste trabalho descrevem-se todas as envolvidas características dos processos, para que posteriormente seja possível colocá-los em frente comparativa. Entre os processos de corte e furação de perfis apresentados os mais utilizados pelas empresas de metalurgia e que possuem maior aceitação são os métodos a plasma, laser, oxicorte e jato d'água que em determinado momento do trabalho são comparados entre si. A aceitação destes métodos provém principalmente de sua qualidade executiva, eficiência energética, produtividade e/ou custo-benefício. De acordo com as comparações realizadas, foi observado que os métodos em muitos casos se complementam, sendo que o oxicorte tem boa aceitação principalmente no mercado nacional devido ao baixo investimento inicial e operacional, o corte a laser é uma excelente complementação do corte a plasma, visto que é mais eficiente em relação a velocidade, qualidade de recorte e consumo de energia em chapas de pequena espessura, já o processo por jato d'água, tem menor aplicação, por se tratar de um processo oneroso e moroso, porém é a complementação ideal para peças espessas e que não podem ser recortadas pelos demais processos ou que mesmo se recortadas não mantem a qualidade esperada.

PALAVRAS-CHAVE: Corte Térmico; Cortes Mecânicos; Laser; Oxicorte; Plasma; Jato D'água.

ABSTRACT

The search for fast and less aggressive construction systems for the environment is becoming more and more common in Brazil, due to this perspective, the use of metallic structures, which is a plausible alternative, as it is a constructive system that promotes rationalization of the raw material and labor for execution, greater than the reinforced concrete system, will be one of the focuses of this work. Considering the fact that civil construction alters nature every time it performs some type of work, either through new constructions or renovations, generating waste or even extracting the natural resources necessary for their execution, analyzes will be carried out, of the methods of cutting and drilling metallic profiles, to compare certain parameters in order to point out which method has the lowest environmental impact, the highest productivity and the best cost-effectiveness for the analyzed situations. This analysis will be carried out through theoretical research in academic literature in addition to market research, through a questionnaire sent to companies in the sector. In this work all the involving characteristics of the processes are described, so that later it will be possible to put them in a comparative front. Among the profile cutting and drilling processes presented, the most used by metallurgy companies and which have the greatest acceptance are the plasma, laser, oxyfuel and water jet methods, which at a certain point in the work are compared with each other. The acceptance of these methods mainly comes from their executive quality, energy efficiency, productivity and/or cost-effectiveness. According to the comparisons made, it was observed that the methods in many cases complement each other, and oxyfuel has good acceptance mainly in the national market due to the low initial and operational investment, laser cutting is an excellent complement to plasma cutting, since it is more efficient in terms of speed, cutting quality and energy consumption in thin plates, whereas the water jet process has less application, as it is a costly and time-consuming process, but it is the complementation ideal for thick pieces that cannot be cut by other processes or that, even if cut, do not maintain the expected quality.

KEYWORDS: Thermal Cutting, Mechanical Cutting, Laser, Oxyfuel, Plasma, Water Jet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alto forno da csn.....	24
Figura 2 - Quantidade, em toneladas, de aço produzido e destinado a construção civil.....	25
Figura 3 - Evolução da produção de estruturas de aço.....	27
Figura 4 - Resumo da cadeia produtiva da indústria brasileira de estruturas metálicas.....	28
Figura 5 - Faturamento da indústria geral de fabricação de produtos de metal – 2008 e 2009 (em R\$ bilhões).....	29
Figura 6 - Demonstração do processo de puncionamento e sua variação de diâmetro.....	38
Figura 7 - (A)Etapas do processo de puncionamento; (B) Componentes básicos do processo adaptado.....	38
Figura 8 - Maçarico de corte.....	40
Figura 9 - Relação entre diminuição da pureza e velocidade de corte.....	41
Figura 10 - Relação entre diminuição da pureza e velocidade de corte.....	42
Figura 11 - Curvas estequiométricas de combustíveis.....	42
Figura 12 - Variação da velocidade x espessura (oxicorte).....	43
Figura 13 - Estação de trabalho simples.....	45
Figura 14 - Maçarico combinado para operações de soldagem e corte.....	46
Figura 15 - Maçarico com misturador no bico.....	46
Figura 16 - Velocidade de corte do aço carbono.....	48
Figura 17 - chapa metálica recebendo recortes a plasma.....	49
Figura 18 - Processo de corte por plasma.....	50
Figura 19 - Constituição de uma tocha plasma.....	51
Figura 20 - Variação da velocidade com a espessura (plasma).....	51
Figura 21 - O processo do corte a laser.....	54
Figura 22 - Funcionamento de um sistema laser.....	55

Figura 23 - Representação de corte por guilhotina.....	56
Figura 24 Região crítica de projeto.....	57
Figura 25 - Guilhotina newton.....	58
Figura 26 - Geometria das ferramentas de corte.....	59
Figura 27 - Seção de serra fita horizontal.....	62
Figura 28 - Maquinário serra fita horizontal.....	63
Figura 29 - Recortes feitos por máquina de corte por jato de água.....	65
Figura 30 - Esquema básico de um equipamento de corte por jato de água	66
Figura 31 - Tonalidade de calor após recorte por plasma (2mm).....	70
Figura 32 - Tonalidade de calor após recorte por oxicorte (>10mm).....	70
Figura 33 - Escória gerada pelo processo de oxicorte.....	71
Figura 34 - Escória gerada pelo processo de plasma.....	71
Figura 35 - Comparação, tempo de corte, laser x plasma (espessura de chapa 2mm).....	75
Figura 36 - Comparação, tempo de corte, laser x plasma (espessura de chapa 12mm).....	75
Figura 37 - Comparação de custo operacional, laser x plasma.....	76
Figura 38 - Corte à plasma e à frio.....	80
Figura 39 - Comparação entre os processos de corte para os indicadores ambientais: (i) Consumo de energia; (ii) Material retirado.....	82
Figura 40 - Custo mensal.....	89
Figura 41 - Produtividade mensal.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das folgas de corte comumente utilizadas.....	60
Tabela 2 - Oxicorte x Plasma	72
Tabela 3 - Comparação custo operacional plasma x oxicorte.....	73
Tabela 4 - Comparação entre os métodos de corte a plasma x laser x jato d'água.....	77
Tabela 5 - Comparação entre velocidades de cortes para peças com diferentes espessuras, para o corte a plasma (14-16kw) e corte por jato d'água (27kw).....	78
Tabela 6 - Custo por peça em dólar.....	86
Tabela 7 Comparação entre oxicorte x laser.....	88
Tabela 8 Resultado final (continua).....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre os métodos de corte laser x oxicorte.....	72
Quadro 2 - Comparação entre os diferentes métodos de corte.....	74
Quadro 3 - Comparação entre os métodos de corte a plasma x laser.....	77
Quadro 4 - Comparações feitas entre jato d'água e corte a plasma.....	79
Quadro 5 - Comparações feitas entre jato d'água e corte a plasma.....	82
Quadro 6 - Oxicorte x laser.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Kerf	Largura da fenda
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
mm	Milímetros
min	Minutos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da construção civil.
RCD	Resíduo de construção e demolição
s	Segundos
ton	Toneladas
ZTA	Zona termicamente afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – Celsius

μm – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	18
1.1.1	Objetivos específicos.....	18
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	A SUSTENTABILIDADE E CONSTRUÇÃO CIVIL.....	19
2.2	GESTÃO DE RESÍDUOS E CONSTRUÇÃO CIVIL, ASPECTOS GERAIS.....	22
2.3	ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO.....	23
2.3.1	A origem do aço carbono	23
2.3.2	O aço na construção civil	25
2.3.3	A destinação de resíduos do corte	30
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	QUESTIONÁRIO	33
3.2	ANÁLISE COMPARATIVA.....	34
4	OS MÉTODOS ANALISADOS	36
4.1	OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE RECORTE E FURAÇÃO DE PERFIS METÁLICOS	36
4.1.1	Relevância para a construção civil.....	36
4.2	PUNÇIONAMENTO	37
4.2.1	Definição	37
4.2.2	Materiais e métodos.....	37
4.3	OXICORTE.....	39
4.3.1	Definição	39
4.3.2	Materiais e métodos.....	39
4.4	PLASMA	46
4.4.1	Definição	46
4.4.2	Materiais e métodos.....	48
4.5	LASER	52
4.5.1	Definição	52
4.5.2	Materiais e métodos.....	53
4.6	GUILHOTINA	55
4.6.1	Definição	55

4.6.2	Materiais e métodos.....	57
4.7	SERRA FITA	60
4.7.1	Definição	60
4.7.2	Materiais e métodos.....	61
4.8	CORTE POR JATO DE ÁGUA.....	63
4.8.1	Definição	63
4.8.2	Materiais e métodos.....	64
5	COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE CORTE E FURAÇÃO DE PERFIS	67
5.1	PLASMA X OXICORTE.....	68
5.1.1	Características dos processos	68
5.1.2	Economia energética	69
5.1.3	Qualidade	69
5.1.4	Viabilidade econômica	73
5.2	PLASMA X LASER	73
5.2.1	Características dos processos	73
5.2.2	Economia energética	74
5.2.3	Qualidade	76
5.2.4	Viabilidade econômica	77
5.3	JATO D'ÁGUA X PLASMA	78
5.3.1	Características dos processos	78
5.3.2	Economia energética	79
5.3.3	Qualidade	79
5.3.4	Viabilidade econômica	80
5.4	JATO D'ÁGUA X LASER	81
5.4.1	Características dos processos	81
5.4.2	Economia energética	82
5.4.3	Qualidade	83
5.4.4	Viabilidade econômica	83
5.5	JATO D'ÁGUA X OXICORTE.....	84
5.5.1	Características dos processos	84
5.5.2	Economia energética	85
5.5.3	Qualidade	85

5.5.4	Viabilidade econômica	86
5.6	LASER X OXICORTE	86
5.6.1	Características dos processos	86
5.6.2	Economia energética	87
5.6.3	Qualidade	87
5.6.4	Viabilidade econômica	89
6	RESULTADO	91
7	CONCLUSÃO.....	93
8	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE MERCADO	95
	<u>Empresa (1).....</u>	95
	<u>Empresa (2).....</u>	97
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da tecnologia em diversos setores da economia e as preocupações crescentes com o meio ambiente, o desenvolvimento de processos mais eficientes, ecologicamente sustentáveis e que geram menos gastos se tornou um padrão das empresas que buscam redução em seus custos e a redução de seus impactos negativos. Além desses fatores, o marketing positivo gerado por medidas mais sustentáveis atrai consumidores e oportunidades de negócio.

O mercado competitivo no segmento fabril exige que os sistemas de produção sejam flexíveis, adaptáveis e mais produtivos, com menores custos e prazos de produção mantendo-se a qualidade segundo Layer, Kaerwowski e Furr (2009).

A indústria da construção civil tem a necessidade de tornar os projetos mais sustentáveis e eficientes uma vez que é um setor da economia que mais transforma o meio ambiente natural em urbanizado, planejando paisagens para a construção de edifícios, indústrias e obras de grande porte como aterros, estradas e barragens.

É possível citar a busca por redução da geração de resíduos em várias etapas dos processos construtivos dos exemplos de obras mencionados anteriormente. O aumento da eficiência energética com projetos mais ecológicos, sistemas de geração de energia alternativos integrados a edificações e aterros, redução dos resíduos gerados com sistemas construtivos envolvendo estruturas metálicas e de concreto e a pré-produção de partes, se não toda, a estrutura de um edifício e o tipo de acabamento que se dá à cada parte de um projeto. Todos esses, são exemplos de métodos e recursos para uma busca de “melhoria ecológica” da construção civil.

O estudo da sustentabilidade nas diversas etapas de uma obra da construção civil é necessário para garantir que não ocorram gastos desnecessários, geração de resíduos em excesso e retrabalho, pois esses três itens implicam em aumento de gasto energético e consumo ineficiente de recursos naturais de acordo com Liubartas *et al.* (2015). Tendo esse princípio, a proposta deste estudo é analisar o valor sustentável e econômico dos métodos de recorte e furação de perfis metálicos além de suas respectivas eficiências.

Alguns tipos de obras já utilizam estruturas metálicas por serem mais práticas e rápidas de serem construídas em relação a estruturas de concreto armado, como galpões e silos de

armazenagem. Além da praticidade, engenheiros e arquitetos atualmente buscam, sistemas construtivos mais limpos, podendo optar por estruturas metálicas para agilizar o processo construtivo substituindo os materiais de construção tradicionais, como o concreto, tijolo cerâmico e a argamassa, por materiais que podem ser reciclados ou reutilizados após o uso.

Para que o processo de construção seja considerado menos ou mais poluidor, é necessário analisar o processo construtivo e etapas anteriores, uma vez que a redução de resíduos gerados na obra é um dos principais pontos de influência na geração de resíduos sólidos, porém esta é apenas uma etapa do ciclo, que parte desde a obtenção e refino da matéria prima até a embalagem e transporte do material como explica Liubartas *et al.* (2015).

1.1 OBJETIVOS

Estudar os diferentes tipos de processos de recorte realizados no mercado nacional, visando apontar em grau comparativo quais características tornam ou não os processos de recorte e furação viáveis.

1.1.1 Objetivos específicos

Este estudo visa analisar, por meio de conceitos presentes na engenharia civil como gestão de resíduos, diminuição de retrabalho, redução de gasto energético e tempo despendido para execução de um mesmo processo, os métodos de corte usados em estruturas e perfis metálicos, apontando para aqueles que tendem a atender melhor a demanda vigente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A sustentabilidade e construção civil

A expressão sustentabilidade como apresentada neste texto é fundamentada na abordagem discutida por Lamim-Guedes (2013 *apud Sachs, 2002*), que preconiza a existência de cinco dimensões da sustentabilidade. Sachs enunciou as cinco dimensões da sustentabilidade do ecodesenvolvimento, como denominado pelo próprio autor: social, econômica, ecológica, espacial e cultural.

A abordagem proposta neste texto contempla uma discussão sobre a visão de alguns aspectos mencionados pelo sociólogo francês discutida por Lamim-Guedes (2013 *apud Sachs, 2002, p. 85-88*) a serem consideradas para a construção de um enfoque sustentável para as organizações. Após uma breve contextualização das dimensões descritas pelo autor, será desenvolvido o tema com o enfoque na visão mais adequada para este trabalho.

Segundo Sachs, a *dimensão social* da sustentabilidade se relaciona com a distribuição justa de renda, a disponibilidade de empregos, boa qualidade de vida e igualdade no acesso aos recursos e serviços sociais.

A *dimensão econômica* da sustentabilidade garante o alicerce financeiro necessário para a continuidade de um negócio, sendo a capacidade de modernização e a autonomia em pesquisa e tecnologia, igualmente importantes na condução de um processo de desenvolvimento econômico equilibrado Lamim-Guedes (2013 *apud Sachs, 2002, p. 85-88*). Para que exista uma sustentabilidade econômica em um negócio, é necessário que aquele que oferece o produto ou serviço, tenha consciência que é necessário exercer a conservação do meio ambiente, uma vez que se extrai da natureza os recursos para a fabricação do produto.

Ainda sobre a dimensão econômica da sustentabilidade, é possível citar a premissa de Leripio (2015). “O negócio tem que ser lucrativo”. O lucro de um negócio pode ser maior a partir da economia gerada com a eliminação de desperdícios e retrabalho, por exemplo, do que com o aumento de preços, que o mercado regula.

Para Sachs, a *dimensão ecológica* da sustentabilidade se refere a exploração do total potencial inerente de diversos sistemas ecológicos sem comprometer a capacidade dos mesmos de se recuperarem.

No quesito *territorial*, Sachs afirma que deve haver uma distribuição equilibrada entre território urbanizado e rural, salvo concentrações geográficas específicas. Existe uma desigualdade de investimento em infraestrutura de habitação quando se compara as iniciativas de habitação, saneamento, educação, saúde e transportes entre zonas rurais e urbanas. O estudo e planejamento do desenvolvimento urbano e rural deve ser feito para evitar que aglomerados urbanos mal planejados surjam.

Outra dimensão, a *sustentabilidade cultural*, para Sachs, diz respeito a independência de tecnologia, ou seja, o desenvolvimento de tecnologias e processos próprios das empresas sem necessidade de “importar” de outra empresa.

Por fim, a *sustentabilidade temporal*, proposta adicionalmente por Lamim-Guedes (2013), embora implícita nas colocações do sociólogo francês, pode ser explicitada pela seguinte afirmação, aplicada à realidade das empresas e suas relações com o estoque de recursos naturais: “O negócio pode ser mantido ao longo do tempo, sem restrições ou escassez de insumos e matérias primas”. É possível explicar a ideia presente nessa frase por meio dos conceitos de matérias primas renováveis e não renováveis.

Se o negócio utiliza recursos renováveis como matéria-prima, é esperado que promova ações de conservação de sua capacidade regenerativa ou respeite seu ciclo natural, caso utilize matérias primas oriundas de recursos naturais não renováveis, proporcionando o “fechamento de ciclos”, de forma a manter sempre a viabilidade do negócio a partir da reciclagem dos produtos pós-consumo, por exemplo como faz a indústria do alumínio no Brasil e no mundo. (Lamim-Guedes, 2013)

A busca por um modelo de construção mais sustentável é um grande desafio para quem projeta, constrói e promove a manutenção de edificações. Responder à exigência da sociedade por edifícios que causem menos impactos ao ambiente requer de todos os profissionais da cadeia empenho, conhecimento e o uso de tecnologias.

A geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) nas cidades vem crescendo significativamente no último período. São resíduos provenientes da construção da infraestrutura urbana, de responsabilidade do poder público e, principalmente, da ação da iniciativa privada na construção de novas edificações, nas ampliações e reformas de edificações existentes e sua

demolição, Ministério do meio ambiente - mma (2010). Esses “produtos” gerados pela construção envolvem uma longa cadeia de abastecimento e requerem uma grande quantidade de mão de obra, recursos naturais e energia para serem realizados. Ao serem concluídos, suprem necessidades nas mais distintas áreas, como saúde, educação, moradia, indústria e infraestrutura urbana. É inerente desses processos a geração de resíduos tóxicos e não tóxicos, desde a geração da matéria prima até o produto final.

Por meio da legislação brasileira moderna já é organizado e classificado a destinação correta final desses resíduos, sejam eles recicláveis ou não. Mesmo que ainda exista uma grande parte da destinação desses resíduos de forma correta, a destinação irregular ainda existe. No Brasil apenas 20% dos resíduos de construção são reciclados e metade dos municípios encaminha os RCC diretamente para lixões, aterros sanitários ou para disposição irregular, conforme a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição, Ecoresponse (2020). Por outro lado, o resultado obtido pela construção civil, como fonte de renda para inúmeras famílias, fonte de melhores condições de vida urbana e desenvolvimento social é um resultado positivo, inegável e indispensável.

Os impactos causados pelos resíduos das diversas cadeias produtivas e de fornecimento da construção civil apresentam um alto grau de complexibilidade de análise dos impactos no meio ambiente. O que é possível analisar atualmente, mostra que é necessário detalhar, quantificar e qualificar com precisão os recursos naturais e fontes energéticas utilizadas, assim como os poluentes depositados no meio ambiente, buscando linhas de ação para reduzir os resíduos gerados em cada etapa da cadeia.

Uma análise de qualidade na cadeia produtiva da construção exige que se incorpore a aplicação de materiais, assumindo que sua extração e produção se fundamentem nos princípios da gerência integrada do seu ciclo de vida assim explica Blumenschein (2009). A mudança dos procedimentos e tecnologias, que vêm sendo utilizadas pelo setor da construção requer um exercício de aprendizado quanto a diferentes maneiras de se produzir o ambiente construído, dando início a um percurso diferente das decisões ao projetar, construir e utilizar o que se constrói. Envolve princípios e conceitos norteadores da arquitetura e urbanismo sustentável.

2.2 Gestão de resíduos e construção civil, aspectos gerais

Todo processo econômico gera resíduos. Apesar de grande parte dos resíduos da construção civil (RCC) serem considerados inúteis por grande parcela da sociedade, os resíduos possuem, aproximadamente, 40% de materiais recicláveis. Os RCCs foram inicialmente definidos na legislação brasileira como o conjunto dos produtos não aproveitados das atividades humanas de implantação e transformação dos bens de consumo na construção civil de acordo com Leite *et al.* (2018 apud Figueiredo, 1994). Posteriormente, o art. 13, inciso I, da Lei n.º 12.305/2010, ao estabelecer uma classificação para os vários tipos de resíduos também definiu estes como “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo-se os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”.

A gestão correta dos resíduos da construção civil é de extrema importância atualmente, tal fato é sustentado por dados que mostram que existe uma produção de esgoto de 150 L/(hab.*dia) segundo a associação brasileira de normas técnicas de 1993, já a produção de lixo chega de 1,0 a 1,5 kg hab/dia de acordo com Silva (2018 apud Kaza et al. 2018) e entulho/ Resíduo de construção e demolição (RCD): 1 a 3 kg hab/dia de acordo com Silva (2018 apud Abrelpe, 2017).

Tais números indicam que o desenvolvimento tecnológico aliado a processos desenvolvidos por engenheiros e pesquisadores devem buscar alternativas para sistemas integrados que promovam mudanças em diversos setores da sociedade quanto ao quesito geração de resíduos. Processos que geram retrabalho, desperdícios e sobras devem ser se possível eliminados ou substituídos por métodos mais eficientes de produção, além disso, a correta destinação e tratamento dos resíduos gerados deve ser acompanhada pela empresa em todas as etapas.

Segundo a classificação da resolução Conama 307, existem 4 classes principais de resíduos produzidos no Brasil:

- A: resíduos que são recicláveis ou reutilizáveis como agregados, dentro da própria construção; como tijolos, madeira e concreto
- B: Resíduos recicláveis de diversas áreas; como: papel, plástico, ferro, aço

- C: Resíduos sem tecnologia ou com tecnologia economicamente inviável para reciclagem.
- D: Resíduos perigosos ou que podem apresentar risco grave de contaminação do solo; Como tintas, solventes e óleos.

Para evitar a geração de resíduos da construção civil, muitas construtoras buscam adotar sistemas construtivos “a seco”, ou seja, não utilizam concreto moldado *in loco* e preferem utilizar sistemas de pré-moldados em fábrica ou o uso de estruturas metálicas para acelerar o processo construtivo e reduzir a geração de resíduos.

Propor um questionamento sobre o impacto causado pela produção de matérias primas para sistemas construtivos não tradicionais promove novas análises sobre o ciclo de vida de uma obra, quando analisado desde o início da extração da matéria prima. As soluções para a ponta da cadeia já existem e podem ser eficientes se executadas de forma correta, garantindo até mesmo certificações ambientais. Por outro lado, também cabe analisar partes subjacentes dessa cadeia em que as matérias primas ou os materiais usados na construção ao serem produzidos, acabam gerando uma grande quantidade de resíduos.

Para este trabalho, será analisado em comparativo como os processos de corte e furação de perfis podem reduzir a geração de resíduos na produção de perfis metálicos se bem determinados, estes são empregados em diversos empreendimentos da construção civil, como em coberturas, plataformas, pipe racks, cable racks, pipe ways, monovias, escadas, passarelas, paredes de vento e até mesmo fundações e esqueleto de estruturas inteiras. Uma redução do impacto no início da cadeia construtiva gera impactos significativos, uma vez que o uso de estruturas metálicas é amplo no mercado nacional.

2.3 Estruturas metálicas na construção

2.3.1 A origem do aço carbono

Ferraz (2003) explica que o processo de produção do aço começa na siderúrgica, que é a empresa responsável pela transformação do minério de ferro em aço, de maneira que ele possa ser usado comercialmente, por meio do processo de redução. Primeiramente, o minério cuja origem básica é o óxido de ferro (FeO) é aquecido em fornos chamados de alto fornos (Figura 1 Alto forno da CSN), em presença de carbono (sob a forma de coque ou carvão vegetal) e de

fundentes (que são adicionados para auxiliar a produzir a escória, que, por sua vez, é formada de materiais indesejáveis ao processo de fabricação).

Figura 1 Alto forno da CSN



Fonte: Ribas (2022).

O objetivo desta primeira etapa é reduzir ao máximo o teor de oxigênio da composição FeO . A partir disso, obtém-se o denominado ferro-gusa, que contém de 3,5 a 4,0% de carbono em sua estrutura. Como resultado de uma segunda fusão, tem-se o ferro fundido, com teores de carbono entre 2 e 6,7%. Após uma análise química do ferro, em que se verificam os teores de carbono, silício, fósforo, enxofre, manganês entre outros elementos, o mesmo segue para uma unidade da siderúrgica denominada aciaria, onde será transformado em aço.

O aço, será o resultado da descarbonatação do ferro gusa, controlando-se o teor de carbono para no máximo 2%. O que temos então, é uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono, este último variando de 0,008% até aproximadamente 2,11%, além de outros elementos residuais.

Tal variação na porcentagem de carbono produz uma gama variada de tipos de aço, com diferença em relação ao tamanho e uniformidade das partículas que os compõem, além de diferenças na composição química.

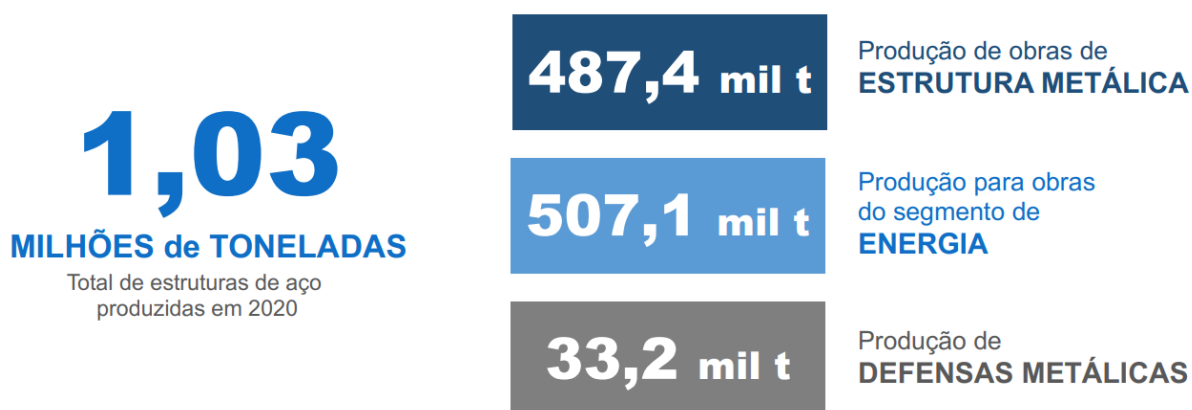
Essa variedade nas propriedades possibilita a oferta de diversos tipos de aços no mercado que são utilizados para finalidades específicas, em que são adotados levando em consideração valores de tensões de ruptura e escoamento, por exemplo.

2.3.2 O aço na Construção Civil

O aço tem sido cada vez mais utilizado nas construções, e isso se deve as necessidades que não são satisfeitas pelo uso de outros materiais. Para estruturas metálicas por exemplo, a precisão deve ser medida em milímetro, o que possibilita um maior nivelamento de acordo com Nardin (2008), e assim diminui problemas como estruturas fora de prumo.

Dados da pesquisa realizada pela Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM) em 2021, quase metade da produção das estruturas de aço foi destinada para obras de energia, sendo o segmento mais representativo, assim como indicado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 Quantidade, em toneladas, de aço produzido e destinado a construção civil



Fonte: ABCEM (2021).

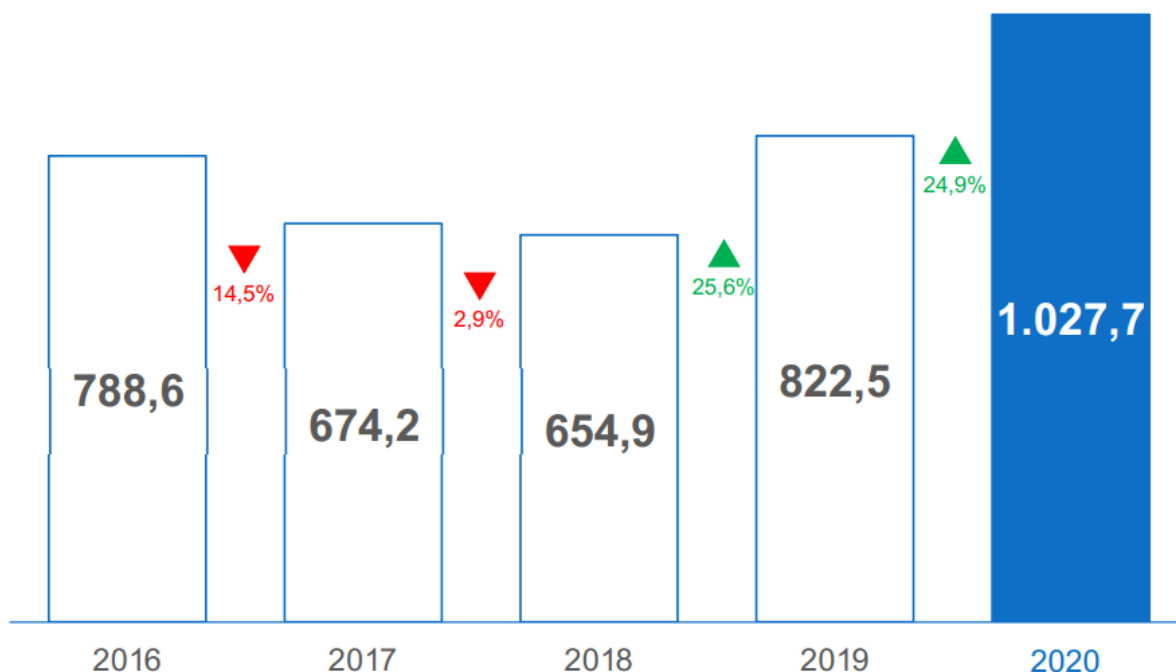
Segmento de estruturas metálicas compreende, para o estudo realizado pela ABCEM, estrutura de pontes e viadutos, estruturas para coberturas, obras comerciais, residenciais e industriais. Energia engloba torres de transmissão, torres de energia eólica e estruturas para parque solar de acordo com ABCEM (2021).

As estruturas de aço são versáteis e compatíveis com qualquer material, podendo ser usados blocos, tijolos, lajes, painéis de concreto e dry wall. Outro aspecto positivo associado com o uso do aço é a possibilidade de uma maior organização do canteiro de obras, já que o aço é pré-fabricado e não gera um grande depósito de matéria prima segundo Nardin (2008).

Segundo Faleiros, Junior e Santana (2012), a indústria de estruturas metálicas, amplamente difundida em países como Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha há décadas, vem apresentando um expressivo crescimento no Brasil nos últimos anos. O consumo de aço destinado às estruturas metálicas passou de 324 mil toneladas em 2002 para 1,6 milhão de toneladas em 2009, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e os desembolsos do BNDES destinados a empresas do setor saltaram de cerca de R\$ 6 milhões em 2001 para mais de R\$ 156 milhões em 2010.

Em 2020 a produção de estruturas de aço no Brasil foi superior a 1 milhão de toneladas, com um crescimento de 24,9% em relação ao ano de 2019. Tais dados podem ser observados na Figura 3 Evolução da produção de estruturas de aço, a seguir. Em 2018 o volume de produção atingiu seu patamar mais baixo. Considerando o período de 2018-20, o crescimento acumulado é de 56,9%.

Figura 3 Evolução da produção de estruturas de aço

Evolução da produção de estruturas de aço (mil t/ano)

Fonte: ABCEM (2021).

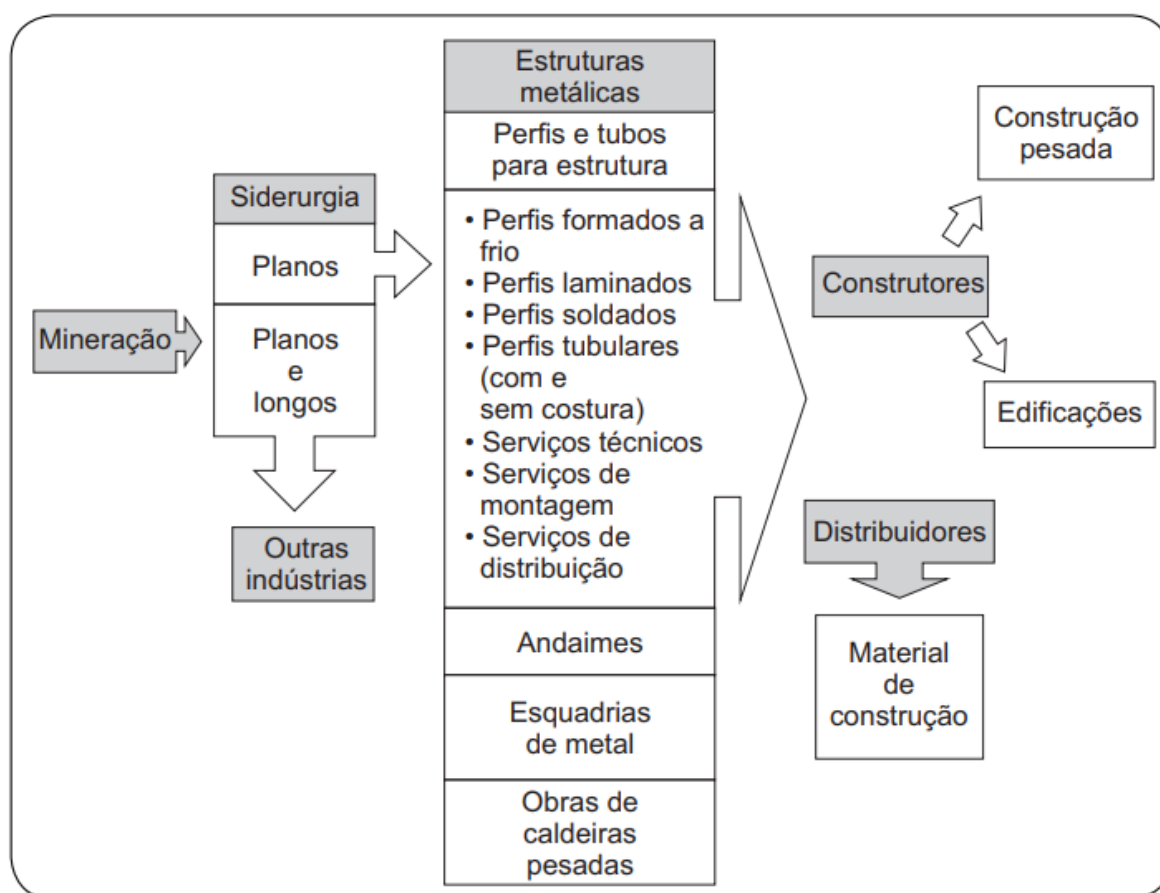
Estruturas metálicas apresentam uma grande diversidade de usos dentro da construção civil, tal variedade inclui a construção de galpões, pontes, edifícios, viadutos, antenas, torres de transmissão e pórticos. Essas estruturas são, de modo geral, industrializadas, pois suas peças, os perfis metálicos, são fabricados em indústrias e depois montados nas obras; cumprindo o mesmo papel estrutural que vigas e pilares de concreto armado.

Faleiros, Junior e Santana (2012) apresentam a seguinte divisão para a cadeia produtiva de estruturas metálicas na construção civil:

- Extrativista, que fornece o minério de ferro;
- Siderúrgica, responsável pelo fornecimento de aços planos;
- Indústria de estruturas metálicas, com destaque para os fabricantes de perfis e tubos soldados para estruturas;
- Construtoras, que são os principais consumidores finais.

A cadeia produtiva da indústria de estruturas metálicas, conforme ilustrado na Figura 4, segue as linhas gerais do padrão mundial. O esquema mostrado por Faleiros, Junior e Santana (2012) na Figura 4 explica como.

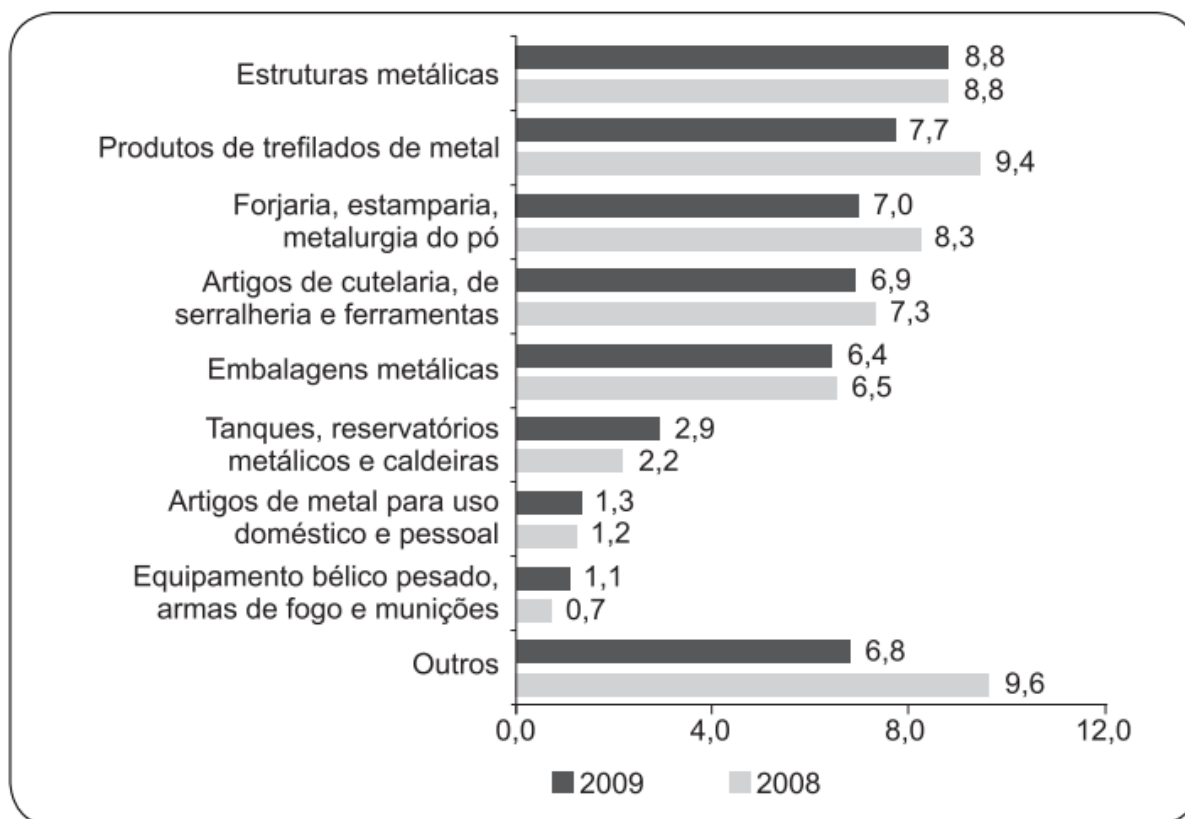
Figura 4 Resumo da cadeia produtiva da indústria brasileira de estruturas metálicas



Fonte: Faleiros, Junior e Santana (2012).

De acordo com o IBGE, a indústria de estruturas metálicas compõe o grupo das indústrias de fabricação de produtos de metal, com uma participação total no faturamento de 16,3% em 2008, que foi de R\$ 54,1 bilhões, e de 51,18% em 2009 (R\$ 48,9 bilhões). Com isso, foi o segmento mais importante em 2009 (Figura 5).

Figura 5 Faturamento da indústria geral de fabricação de produtos de metal – 2008 e 2009 (em R\$ bilhões).



Fonte: Faleiros, Junior e Santana (2012).

Como ilustrado pela Figura 4, a indústria de estruturas metálicas subdivide-se em 4 grupos:

- I. perfis e tubos para estruturas (aço ou alumínio);
- II. andaimes;
- III. esquadrias de metal; e
- IV. obras de caldeiraria pesada.

O grupo mais relevante na indústria de estruturas metálicas é o de fabricação de perfis e tubos para estruturas (aço e alumínio), que representou 70,6% do faturamento total, segundo dados da Pesquisa Industrial Anual do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PIA-IBGE) para o ano de 2009, enquanto a fabricação de andaimes, de obras de caldeiraria e de esquadrias de metal representaram, respectivamente, 2%, 7,7% e 19,7%.

Este trabalho apresenta um foco no grupo de perfis e tubos de aço para estruturas metálicas, os quais podem ser trabalhados e cortados pelos métodos de corte a seguir apresentados neste trabalho. Estes perfis estão presentes em diversos tipos de obras, como obras industriais e comerciais, representam juntas 39% das obras de estruturas já as obras de energia representam 50% do total segundo ABCEM (2021).

O grupo a ser analisado é o de maior volume produzido e uso para a construção civil, assim o impacto causado na cadeia produtiva desta área pode se tornar significativo se analisado pela quantidade consumida de 26,7 milhões de toneladas de aço em 2021 para a área de acordo com Jornal da construção civil (2021).

2.3.3 A destinação de resíduos do corte

Segundo Sellitto e Murakami (2015), as indústrias que fabricam estruturas metálicas produzem três tipos de resíduos principais, são eles: escória, pó e lodo, além desses também há geração de gases que podem ou não ser geradores do efeito estufa e estarem aquecidos. Esses resíduos apresentam baixo valor agregado, o que leva a um menor interesse das indústrias para reciclar devido ao baixo retorno financeiro. Considerando esses dados é necessário que indústrias que trabalham com estruturas metálicas iniciem um processo de gestão de resíduos com viés ecológico para evitar o descarte e acomodação inadequado dos resíduos que produzem.

No estudo de Sellitto e Murakami (2015) os três principais resíduos gerados (escória, pó e lodo) podem ser acondicionados por empresas e assim destinados para o correto fim. A escória metálica pode ser vendida como sucata para reciclagem, o pó deve ser recolhido e destinado a um aterro, já o lodo deve ser tratado para assim ser descartado.

A reciclagem na indústria metálica tem um papel muito importante, uma vez que tem capacidade de reciclar quase todo tipo de resíduo metálico gerado pela indústria mecânica, civil e consumo individual, diminuindo assim a necessidade de extração de matéria prima, geração de resíduos e poluição gerada por estes processos de acordo com Sellitto e Murakami (2015). Além desses motivos, a reciclagem reduz a necessidade de aterros e de geração de energia em novas extrações.

Segundos dados obtidos no questionário de pesquisa descrito no item 8 APÊNDICE A – Questionário de Mercado – As empresas que contribuíram com esta pesquisa informaram que o resíduo metálico gerado é recolhido e vendido como metal de sucata, sendo que uma dessas empresas produz até 100ton/mês de sucata que é vendida para reciclagem, tendo uma produção de 1.200 toneladas/mês de estruturas metálicas. Os resíduos cortados por métodos mecânicos apresentam maior valor de mercado de reciclagem pois podem ser reutilizados dentro da própria empresa para tornearia já que não apresentam zonas termicamente afetadas (ZTA). Já os resíduos metálicos de cortes que apresentam ZTA, possuem menor valor de mercado para reciclagem, uma vez que sua resistência fora comprometida.

Outro dado obtido pelo Instituto de Aço Brasileiro (2018) é que cerca de 88% do aço descartado corretamente é reciclado, o que mostra que atualmente o Brasil tem alto índice de reaproveitamento de aço, porém ainda possui margem para crescimento, este índice sofre impacto direto da política ambiental vigente.

De acordo com Opersan (2021) o setor de metalurgia, que é o mais relacionado com o tema desta pesquisa, exige atenção especial no acompanhamento de seus efluentes, que envolvem sua classificação, armazenamento, transporte, tratamento e destinação final.

Conforme a LEI Nº 12.305 de 02/08/2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a indústria ou empresa geradora tem a responsabilidade sobre a gestão de seus efluentes, mesmo no caso de contratação de um terceiro para o processo de tratamento e destinação.

O primeiro passo após a geração do resíduo é sua classificação que deve seguir a NBR 10004:2004 que estabelece os critérios de classificação segundo os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde humana.

E conta apenas com duas classificações:

- Resíduos Classe I (perigosos): aqueles que apresentam periculosidade e características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos Classe II (não perigosos) subdivididos entre:
 - Classe II A (não inertes)
 - Classe II B (inertes).

No caso das indústrias metalúrgicas os resíduos gerados costumam ser enquadrados na Classe I segundo Opersan (2021) já que geralmente englobam em sua composição óleos, graxas, e produtos químicos tóxicos, reativos ou corrosivos. Porém os resíduos gerados a partir do recorte metálico geralmente são enquadrados na Classe II e de acordo com as empresas que colaboraram com esta pesquisa, estes resíduos são reciclados e retornam a cadeia produtiva, no entanto, a classificação sempre deve ocorrer mediante análise laboratorial.

Após a classificação é necessário se atentar para o armazenamento deste material até que ele seja retirado e para isto existem duas normas que estabelecem os requisitos a serem seguidos a NBR 11174:1990 para resíduos da Classe II e a NBR 12235:1992 para os da Classe I.

A atenção após estas duas etapas são com o transporte, segundo Opersan (2021) quando a indústria conta com uma empresa para tratar de seus resíduos em estações terceirizadas, deve levar em consideração algumas regulamentações da ANTT, como a Resolução nº 5.947, de 1º de junho de 2021.

Na fase final de tratamento e destinação cabem as diretrizes da PNRS (Lei Nº 12.305/10) e da Resolução CONAMA Nº 430/11. Conforme a LEI Nº 12.305 de 02/08/2010, mesmo em casos em que os efluentes são enviados para tratamento em unidades terceirizadas, as indústrias metalúrgicas devem se atentar aos processos e condições da destinação final de seus efluentes. A empresa geradora é corresponsável pelo resíduo e pode ter graves prejuízos em caso de incidentes, decorrente de passivos ambientais, inadequadamente gerenciados. A comprovação de um tratamento adequado e devida destinação final deve ser comprovada através do Certificado de Destinação Final (CDF).

Nakagawa (2021) apresenta macros estatísticos sobre a empresa TenarisConfab, planta do Brasil de tubos com costura localizada em Pindamonhangaba-SP, onde 90% dos resíduos gerados são reutilizados ou reciclados, isto inclui madeira, borras, emulsões e outros resíduos do processo de soldagem. Em 2018, essa porcentagem era de 56%. É importante ressaltar que a empresa recupera e reutiliza 100% dos resíduos gerados no processo de soldagem para a fabricação de aço.

3 Metodologia

Para a realização deste trabalho, foram adotadas duas frentes de estudo são elas a pesquisa bibliográfica voltada a referencial acadêmico e de mercado, como estudos de caso, monografias, sites, artigos e entre outros, já a segunda frente contou com um questionário que fora enviado a empresas do setor de metalurgia e/ou fornecedores de estruturas metálicas para a construção civil. Por meio de pesquisas bibliográficas, foi possível obter o referencial teórico os métodos de corte e furação e parte das comparações entre os métodos, o questionário foi importante para a fundamentação do trabalho e fez com que dados como a produção mensal de resíduos e os principais métodos utilizados no mercado fossem explorados.

3.1 Questionário

Para a elaboração desse trabalho foi utilizado um questionário com as seguintes perguntas:

1. Qual(is) sistema(s) usam para corte de chapas, perfis metálicos, vigas ou telhas metálicas atualmente?
2. Já usou outro equipamento de corte? Se sim, qual era e porque mudou?
3. O(s) equipamento(s) que utilizam geram algum tipo de resíduo?
4. O(s) equipamento(s) que utilizam, tem alguma restrição de uso? (P.e. oxicorte não pode ser usado para vigas metálicas, limite de espessura de chapas/perfis, tipo de material que pode ser cortado etc.)
 - a. Se sim, seria possível explicar quais limitações? Onde poderíamos encontrar tais dados?
5. É necessário algum tipo de tratamento ou acabamento da região que é cortada nas chapas, vigas ou perfis metálicos?
6. Sua empresa já realizou alguma análise de ciclo de vida sobre impactos causados pelo(s) equipamento(s) que utilizam? Se sim, quais foram os critérios utilizados e os dados obtidos?
7. Quais dados técnicos do equipamento poderíamos obter de vocês para análise do equipamento/método de corte a plasma?

8. Caso tenha utilizado outro tipo de equipamento para corte, houve algum tipo de economia com a mudança de equipamento?
9. Há algum dos equipamentos utilizados que seja mais recomendado para o uso em estruturas metálicas?
10. Vocês possuem alguma análise de payback para o(s) equipamento(s) implementados atualmente. Sem que nós invadamos a privacidade de dados da empresa, mas questões como viabilidade e possibilidade e tempo de retorno seriam muito importantes para nossa análise.
- 11- Gostaríamos de saber como a empresa quantifica os cortes que realizam? (p.e. por metro, por perfil ou outra unidade?)
- 12- O que, a empresa que trabalha, faz com esses resíduos? (p.e. tem algum contrato de parceria com alguma empresa de reciclagem ou apenas descartam como lixo industrial).
- 13- Vocês têm algum registro de quantidade desses resíduos produzidos (p.e. 1 ton./mês)? Se sim, poderiam nos informar uma média desses valor?

Estas têm como objetivo principal observar quais são os principais métodos utilizados atualmente, qual a geração de resíduos e impactos gerados pelos métodos e como isto é metrificado.

De modo secundário buscou-se analisar os processos utilizados para acabamento da região recortada, informações técnicas e análise de payback, mesmo que as respostas não tenham sido esclarecedoras.

3.2 Análise Comparativa

Para que fosse possível elucidar de maneira analítica as comparações feitas no item 5 desta monografia fora elaborada uma tabela que visa ranquear os principais tópicos analisados, estes tópicos em suma visam comparar itens que podem influenciar diretamente em dois dos recursos primordiais para as empresas, tempo e dinheiro. Para isto utilizamos 9 pontos comparativos. Esta tabela tem por objetivo trazer os dados referentes a realização de recorte e furação em perfis ou chapas de 6mm e 12mm de espessura.

Os parâmetros foram avaliados de 0 – 10, entende-se que quanto mais próximo a 10, melhor sua performance.

Os parâmetros avaliados foram:

Velocidade de corte: Avalia qual a velocidade do processo em questão, para as espessuras analisadas. Quanto mais próximo a 10, maior a velocidade.

Acabamento: Avalia qual a necessidade de acabamento após finalização do processo de corte. Quanto mais próximo a 10, menor a necessidade de retrabalho.

Custo horário: Avalia qual o custo operacional por hora do corte em questão. Quanto mais próximo de 10, menor seu custo horário.

Qualidade do corte: Avalia se o corte em questão gera ZTA, rebarbas ou imprecisões, se possui a capacidade de realizar cortes limpos e precisos. Quanto mais próximo a 10, maior a qualidade do corte.

Geração de resíduos: Avalia se o corte em questão gera mais ou menos resíduos em seu processo de execução. Quanto mais próximo de 10, menor a geração de resíduos.

Consumo energético: Avalia a quantidade de energia elétrica despendida para a execução do processo. Quanto mais próximo a 10, menor a necessidade de energia elétrica.

Investimento inicial: Avalia o aporte inicial necessário para que seja possível a realização do processo. Quanto mais próximo de 10, menor a quantia despendida.

Variedade de cortes: Avalia a adaptabilidade do processo quanto aos formatos e tipo de recortes possíveis. Quanto mais próximo a 10, maior a adaptabilidade de formas.

Espessura de corte: Avalia qual a faixa de espessura que o corte abrange. Quanto mais próximo a 10, maior a faixa de espessura abrangida.

Ao final é feita uma soma simbólica para cada processo de acordo com a espessura de 6 e 12 milímetros. É importante ressaltar que esta soma não indica necessariamente que um processo é mais ou menos recomendado, como apontado diversas vezes ao longo do trabalho a indicação do melhor método será resultado da análise precisa dos recursos disponíveis, demanda e resultados esperados.

4 Os métodos analisados

Este trabalho realizou uma detalhada pesquisa bibliográfica e uma consulta em diversas empresas que trabalham com estruturas metálicas para a construção civil, sobre os principais métodos de corte e furação disponíveis no mercado atualmente.

4.1 Os principais métodos de recorte e furação de perfis metálicos

Nesse estudo foram analisados métodos de recorte e furação tanto mecânicos como termoquímicos. Esses métodos foram escolhidos por terem uma maior difusão no mercado e abrangerem diferentes formas de corte.

Para a apresentação dos 7 métodos a seguir utilizaremos 2 subdivisões são estas:

Definição: Será delimitado os pontos de atuação do corte, assim como suas principais características;

Materiais e métodos: Detalhes sobre o objeto de estudo, apontando de maneira detalhada os procedimentos que possibilitam a realização do recorte.

4.1.1 Relevância para a construção civil

O corte de materiais é uma das mais importantes etapas na cadeia de produção das estruturas de aço, segundo Ramalho (2013). Os processos de recorte e furação de perfis servem para que seja possível moldar peças metálicas e adequar seus pontos de conexão possibilitando que sejam ligadas umas as outras. Existem diferentes meios para que seja possível alcançar estas características, com diferentes graus de acabamentos, detalhamentos e precisão. No caso dos processos de corte, um dos parâmetros a serem levados em consideração é a qualidade almejada para a área processada, por isto variações ou diferentes métodos de recortes devem ser levados em consideração em análises de resistência.

Segundo Ramalho (2013), podemos dividir os cortes em mecânicos, por fusão de metal, por combinação de fusão e vaporização e por reações químicas. Passando brevemente por cada tipo de corte:

Mecânicos: Consistem no cisalhamento da matéria, adiante serão abordados os métodos de guilhotina, serra fita, puncionamento e jato d'água.

Fusão de metal: Corte através da fusão de uma fina camada do material, utilizando-se de uma fonte de energia geradora de calor, adiante será abordado o método a plasma.

Combinação de fusão e vaporização: Corte que consiste na aplicação e concentração de energia para a realização da cisão, não importando se a fonte de energia é química, mecânica ou elétrica, adiante será abordado o método de corte por laser.

Reações químicas: Este corte consiste no aquecimento através de uma chama ocorrendo reações exotérmicas, seguido de oxidação do metal e posterior expulsão ou divisão através do jato de O₂, adiante será abordado o método de oxicorte.

4.2 Puncionamento

4.2.1 Definição

Segundo Almacam (2019) o puncionamento é o processo que realiza a remoção de matéria através da realização de furos ou a realização de contornos tanto internos como externos, assim como orifícios, pequenas dobras, estampagem, rosqueamento e entre outros. Este processo é adequado à chapas finas de até (3mm), porém é inadequado a formas complexas de recorte, este é um dos processos mais rápidos e econômicos para a realização de formas simples e de furos múltiplos. Produz resíduos sólidos limpos e recicláveis.

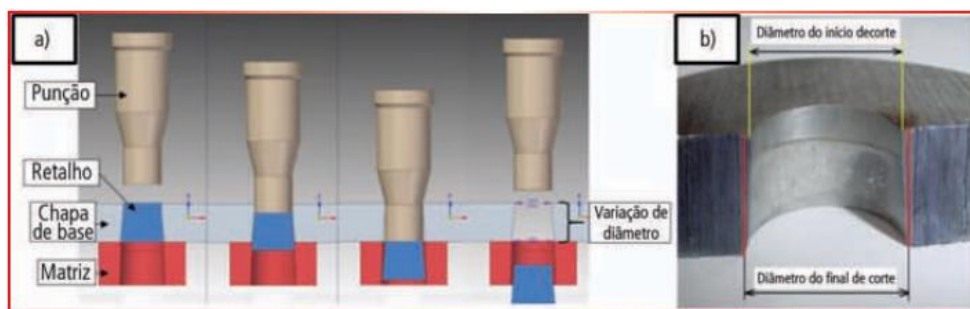
4.2.2 Materiais e métodos

Como explicado por Antunes, Schaeffer e Castelan (2016) o puncionamento possui 4 etapas.

“O processo de puncionamento apresenta as seguintes etapas: Primeiramente, há a aplicação de uma determinada força sobre a chapa, ocasionando a sua deformação elástica, ao passo que a segunda fase compreende a deformação plástica. Ao ser obtida a tensão máxima de cisalhamento, inicia-se o processo de corte da chapa, em que a área tensionada passa a ter de 5 a 10% da espessura do material e apresenta aparência abrilhantada. Em seguida ocorre o início da nucleação de trincas que se propagam até a ruptura final, conforme a atuação contínua da punção sobre a chapa. A região de ruptura abrupta apresenta aspecto poroso.” (ANTUNES, SCHAEFFER e CASTELAN, 2016)

A Figura 6, mostrada a seguir, apresenta uma demonstração digital do processo de puncionamento e o resultado de um corte por puncionamento com sua variação de diâmetro de início e fim de corte bem evidenciados.

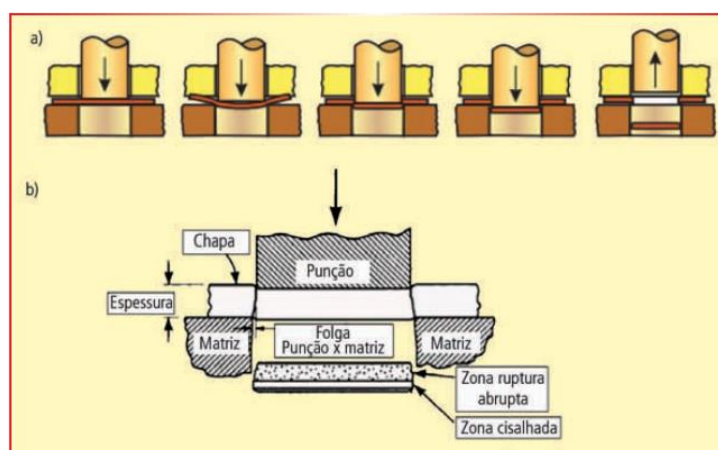
Figura 6 - Demonstração do processo de puncionamento e sua variação de diâmetro



Fonte: Antunes, Schaeffer e Castelan (2016).

A descrição do processo apresentado por Antunes, Schaeffer e Castelan, 2016 pode ser também observada na Figura 7 onde há a descrição de cada componente do processo de corte por puncionamento.

Figura 7 - (A)Etapas do processo de puncionamento; (B) Componentes básicos do processo adaptado



Fonte: Antunes, Schaeffer e Castelan (2016).

Um dos parâmetros de maior relevância para o processo é a folga entre a punção e matriz.

“Quanto ao processo de puncionamento, a folga entre punção e matriz é um dos parâmetros de maior relevância, em que o mau dimensionamento de ambas as partes pode levar a uma série de problemas como, por exemplo, desgaste excessivo das partes ativas das ferramentas, grande esforço dos equipamentos, alto consumo de energia, surgimento e propagação de micro trincas, formação excessiva de rebarbas, entre outros.” (ANTUNES, SCHAEFFER e CASTELAN, 2016)

Apresentam também um dos principais problemas relacionados diretamente com erros em relação a folga aplicada no início do processo.

“Um problema diretamente ligado à furação de chapas grossas é a má qualidade dimensional do furo final. Geralmente, estes furos apresentam um diâmetro inicial diferente do diâmetro final, um tipo de anomalia denominada conicidade, que ocorre devido à diferença de diâmetro entre punção e matriz. Quanto maior for esta folga, maior será a diferença observada nos diâmetros de entrada e saída do furo estampado.” (ANTUNES, SCHAEFFER e CASTELAN, 2016)

Por meio deste podemos entender as principais etapas e precauções que devem ser levadas em consideração antes e ao iniciar-se o processo de puncionamento.

4.3 Oxicorte

4.3.1 Definição

O conceito mais difundido sobre oxicorte é o de ser uma técnica de cortes precisos em objetos metálicos, muito utilizada no setor industrial, e consistir basicamente na ruptura de peças metálicas através da erosão térmica.

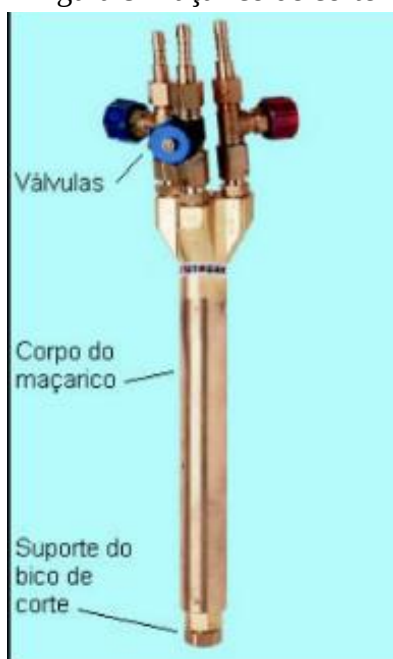
Segundo Ramalho (2013), podemos definir o oxicorte como sendo um processo de seccionamento de metais pela oxidação localizada e contínua devido à ação de um jato de O_2 de elevada pureza, agindo sobre um ponto previamente aquecido por uma chama oxicombustível.

Serrametal (2022) apresenta as limitações deste processo como a possibilidade de recorte apenas em metais que oxidam facilmente, sendo assim mais facilmente utilizado em metais ferrosos, geralmente limitado a aço carbono, aços de baixa liga e ferros fundidos. A maioria dos outros tipos de materiais não podem ser cortados de forma limpa pelo processo de oxicorte.

4.3.2 Materiais e métodos

Na temperatura ambiente e na presença de O_2 o ferro oxida lentamente conforme explicado por Ramalho (2013), a medida que a temperatura se eleva a oxidação se acelera, tornando-se praticamente instantânea por volta de $1350^{\circ}C$, assim sendo o processo baseia-se no aumento de temperatura feito com um maçarico especial de corte, Figura 8, ao atingir a temperatura de oxidação viva ($1350^{\circ}C$) segue-se a injeção de O_2 através do orifício central do bico de corte fixado ao maçarico.

Figura 8 Maçarico de corte



Fonte: Ramalho (2013).

É importante ressaltar quais as condições mínimas para ocorrência do oxicorte:

- Temperatura de início de oxidação viva deve ser inferior à temperatura de fusão do metal;
- A reação deve ser suficientemente exotérmica para manter a peça na temperatura de início de oxidação viva;
- Os óxidos formados devem ser líquidos na temperatura de oxicorte facilitando seu escoamento para possibilitar a continuidade do processo;
- O material a ser cortado deve ter baixa condutividade térmica;

Segundo César (2017), este processo é dividido em duas fases, na primeira etapa o aço é aquecido a altas temperaturas buscando alcançar o ponto ideal para a oxidação acelerada esta chama é produzida por um gás inflamável que pode ser acetileno, propano, propileno, hidrogênio, GLP e até mesmo mistura destes, na segunda etapa utiliza-se uma corrente de oxigênio puro para realizar a oxidação da peça no local aquecido. Por se tratar de um processo envolvendo a reação química de oxidação ele não se aplica a metais não oxidantes como cobre, latão, alumínio, aço inoxidável e entre outros.

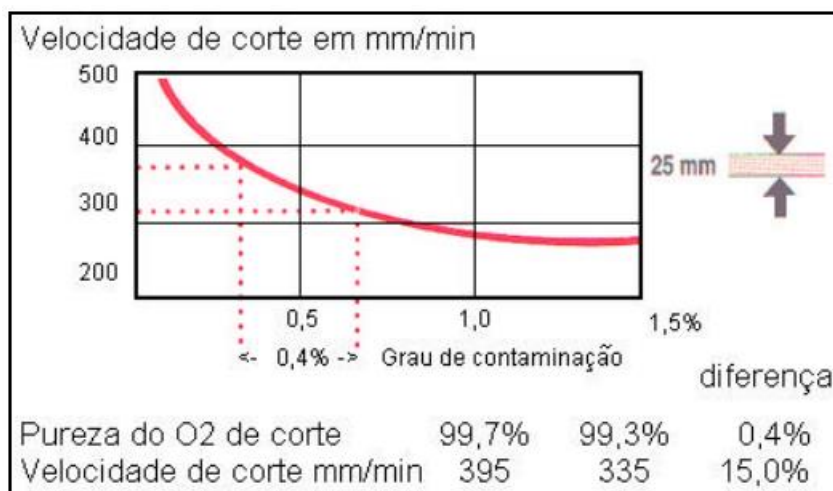
César (2017) ressalta que todo maçarico de corte requer duas condutas, uma para projeção de chama e outra para o corte.

Algumas das variáveis envolvidas nesse processo são:

- Pré-aquecimento do metal de base;
- Espessura a ser cortada;
- Grau de pureza do material a ser cortado;
- Pressão e vazão dos gases;
- Velocidade de avanço do maçarico;
- Grau de pureza do O₂.

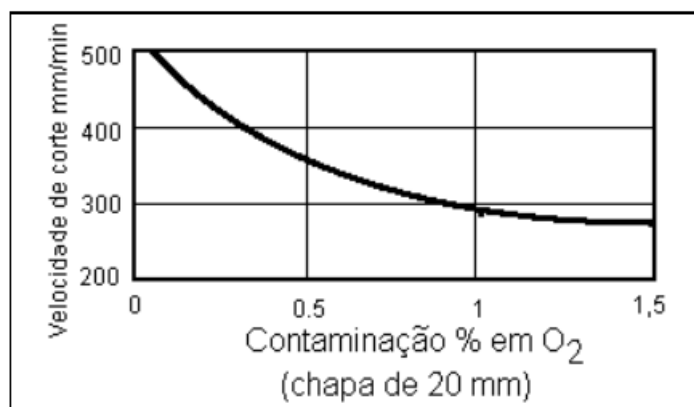
Dois estudos realizados por diferentes autores apresentam a mesma curva de decréscimo da velocidade de corte em função do decréscimo da pureza do O₂. A Figura 9 mostra o estudo feito por Ramalho (2013).

Figura 9 - Relação entre diminuição da pureza e velocidade de corte.



Já a Figura 10 mostra o gráfico com a relação desenvolvida por Mackridge (1995)

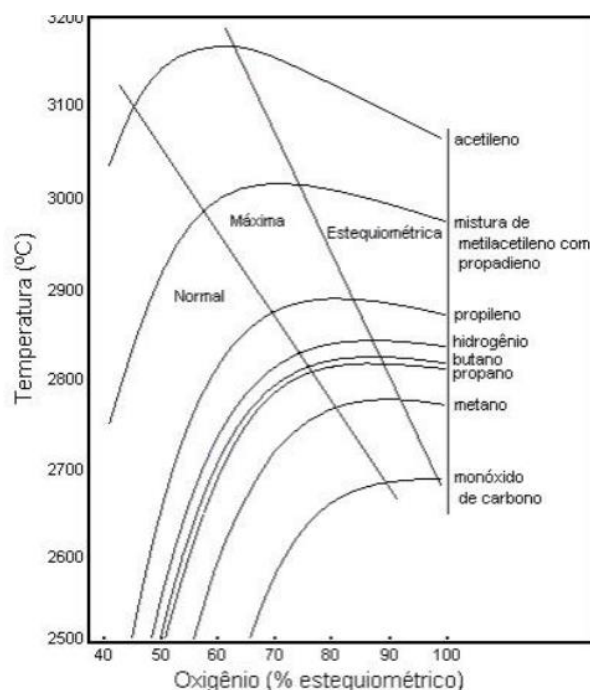
Figura 10 - Relação entre diminuição da pureza e velocidade de corte



Fonte: Mackridge (1995).

É importante destacar que diferentes tipos de gases combustíveis influem na temperatura da chama, no consumo de O_2 e consequentemente no custo final do processo, na Figura 11, que podemos observar abaixo, a combustão de diferentes gases pode ser vista, na abscissa a porcentagem de O_2 consumida e na linha das ordenadas a temperatura atingida.

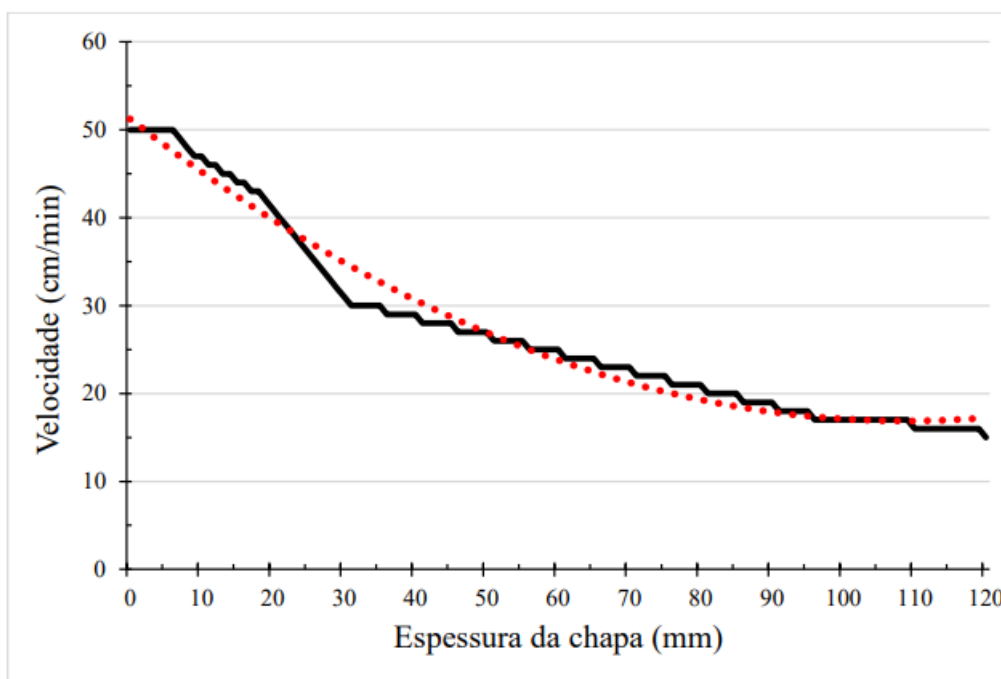
Figura 11 - Curvas estequiométricas de combustíveis.



Fonte: Ramalho (2013).

Mesmo com todas estas variáveis Grenha (2015) nos apresenta uma relação de velocidade de recorte deste processo em relação a espessura da chapa (linha contínua) e uma curva de tendência (linha tracejada), observada na Figura 12.

Figura 12 - Variação da velocidade x espessura (oxicorte)



Fonte: Grenha (2015).

O oxicorte proporciona alguns benefícios que podem ser vistos como diferenciais, são eles segundo Rodoaços (2021):

- Baixo custo dos equipamentos;
- Equipamento adequado para corte, solda, aquecimento;
- O equipamento pode ser portátil;
- Facilidade operacional;
- Ampla gama de espessura;
- Não necessita de energia elétrica.

Um destaque para sua ampla faixa de atuação quando observamos o parâmetro de espessura, este corte pode atuar de 3mm a 2800mm, segundo Messer (2023).

Porém possui algumas desvantagens como:

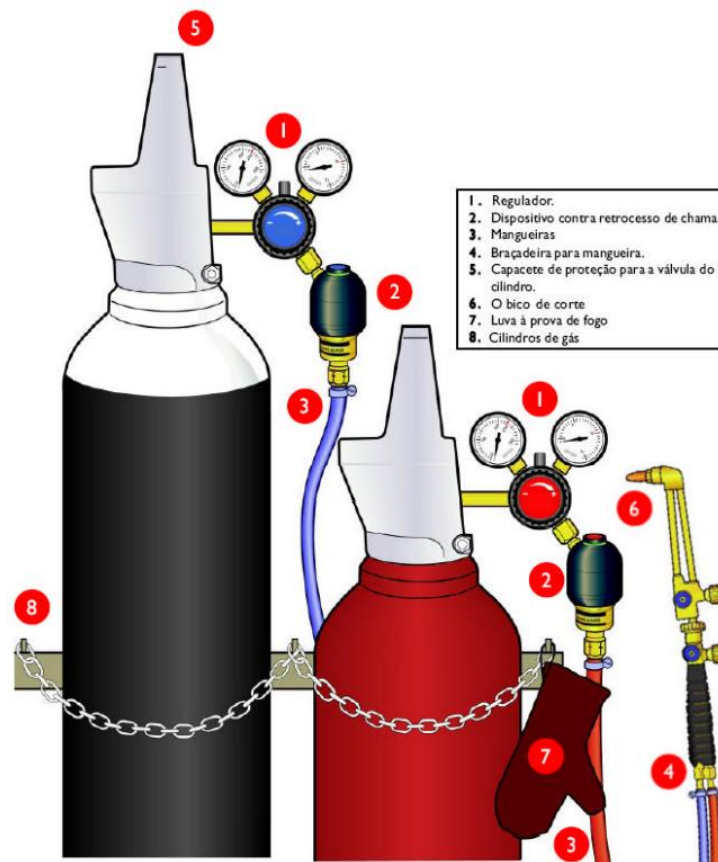
- Restrições: Em função das condições necessárias para corte, a diversos metais usados industrialmente tais como aço inoxidável, níquel, alumínio, cobre e suas ligas, não podem ser cortados por este processo.
- Segurança: A constante manipulação de cilindros de O₂ que, além de ser um gás comburente está sob alta pressão, requer a utilização de ferramental e procedimentos adequados para se evitar vazamentos e explosões.

Em uma configuração simples de estação de trabalho devemos conter no mínimo os seguintes equipamentos segundo Ramalho (2013) para a execução do processo.

- Um cilindro ou instalação centralizada para gás combustível;
- Um cilindro ou instalação centralizada para o O₂;
- Duas mangueiras de alta pressão para condução dos gases, podendo ser três se utilizar maçarico com entradas separadas para o O₂ de corte e gás de aquecimento;
- Um maçarico de corte;
- Um regulador de pressão para O₂, podendo ser dois nos casos de maçarico com 2 entradas de O₂;
- Um regulador de pressão para o gás combustível;
- Dispositivos de segurança (válvulas unidirecionais e contra o retrocesso de chama).

A Figura 13 mostra esquematicamente uma estação de trabalho para corte manual.

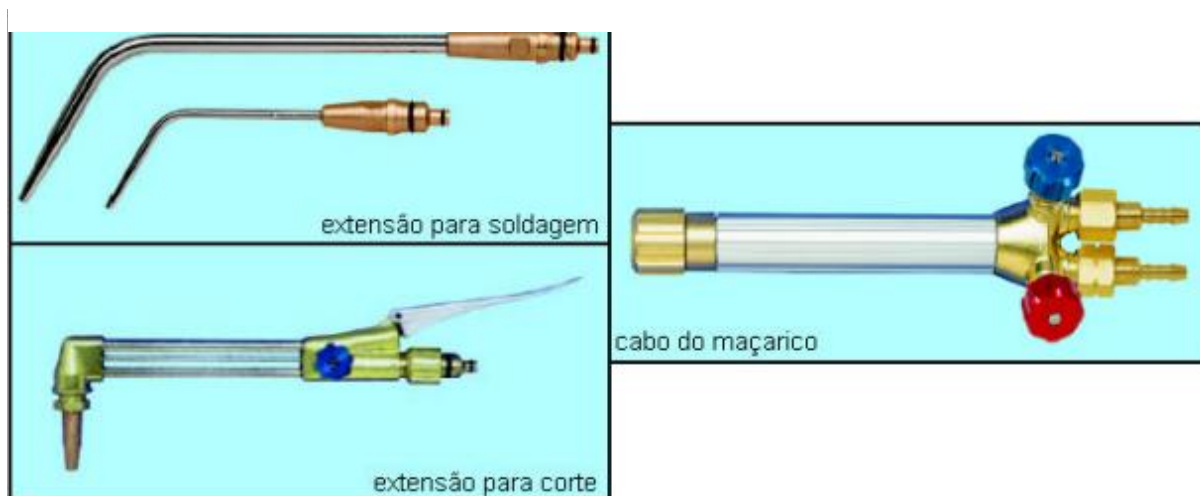
Figura 13 - Estação de trabalho simples



Fonte: Ramalho (2013);

Já as Figura 14 mostram em detalhes o maçarico de soldagem, seus componentes e equipamentos para a extensão do maçarico de soldagem.

Figura 14 - Maçarico combinado para operações de soldagem e corte



Fonte: Ramalho (2013).

A Figura 15 apresenta o maçarico de soldagem com misturador no bico, um modelo alternativo ao tradicional.

Figura 15 - Maçarico com misturador no bico



Fonte: Ramalho (2013).

4.4 Plasma

4.4.1 Definição

O corte a plasma é um dos tipos de corte que possuem maior desempenho em termos energéticos e produtivos do mercado, além de ser capaz de realizar os mais diversos tipos de cortes em diversos tipos de materiais, superfícies e espessuras, podendo estas chegar de 1mm a 80mm de espessura com velocidades de 20m de recorte por minuto, segundo Aço (2015).

O corte por plasma, segundo Gariboldi e Previtali (2004) é um dos processos de corte térmico mais bem difundidos devido a sua alta produtividade e alta flexibilidade a um custo razoável.

O corte por plasma ocupa uma área de extensa aplicação em comparação com o oxicorte e o corte a laser de acordo com Nemchinsky e Severance (2006)

De acordo com os estudos de Ilii e Coteata (2008) este corte possui uma união entre qualidade, produtividade e custo operacional para aço carbono, aço inoxidável e alumínio, levando em consideração suas espessuras e a competitividade do valor dos equipamentos.

Este processo foi desenvolvido e patenteado pelo Dr. Robert Gage em 1957 a serviço da Union Carbide para o corte de aço inoxidável e alumínio. O gás plasma utilizado era o nitrogênio ou mistura de hidrogênio com argônio Ilii, Coteata e Munteanu, 2010.

Este tipo de corte utiliza um bico com um orifício para restringir o gás ionizado em alta temperatura até que possa ser utilizado para cortar seções de metais, como o aço carbono, aço inoxidável, o alumínio e outros metais eletricamente condutores.

Esse processo é o que tem o maior crescimento no mercado por causa da sua velocidade e precisão no corte, segundo Megaplasma (2017).

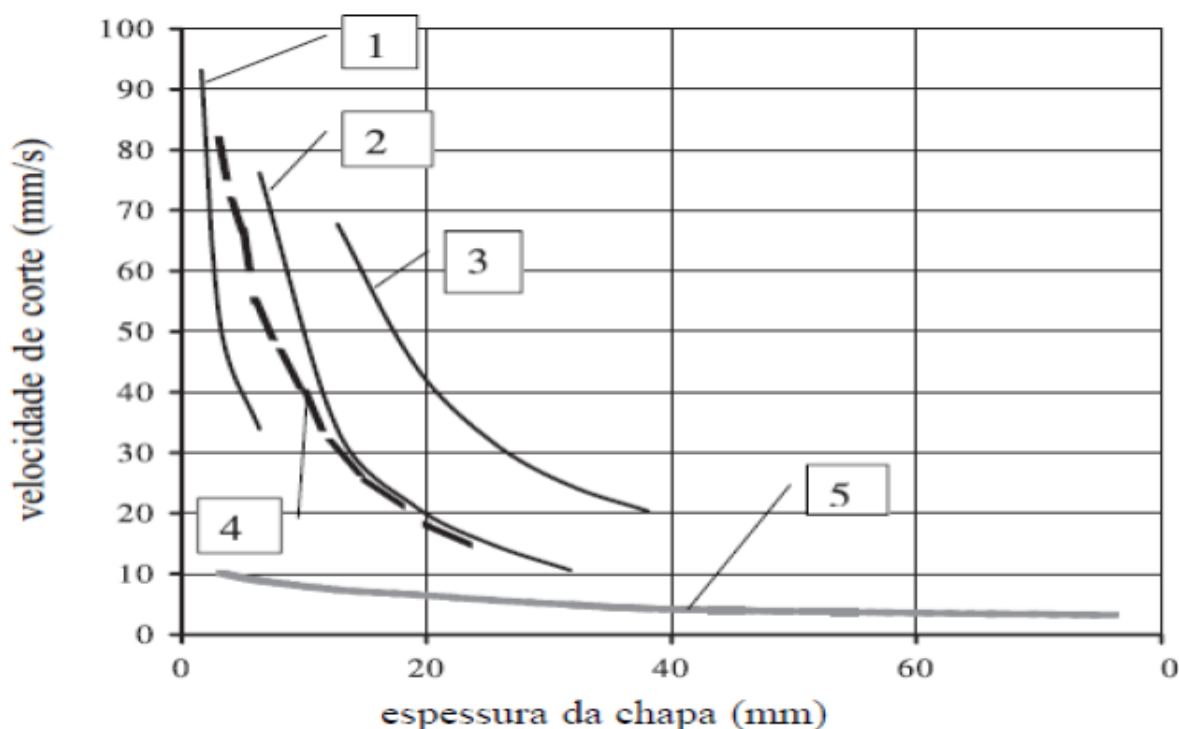
Ao longo do tempo se desenvolveu tecnologicamente e continua como um dos principais métodos de corte de metais. Os tipos de plasmas variam entre manuais e mecanizados.

Os plasmas manuais mais modernos são equipados com sistema de jato coaxial de ar, que restringe ainda mais o plasma, permitindo um corte mais rápido e com menos ângulo. Nos sistemas mecanizados, são utilizados principalmente manipuladores XYZ comandados por controle numérico. Através de um controle mais eficiente dos gases e do sistema de refrigeração respectivamente, incorporam tecnologias que aumentam a consistência do processo e prolongam a vida útil dos componentes consumíveis, Megaplasma (2017).

Segundo Megaplasma (2017) o corte de plasma tem sido usado para substituir processos mais lentos ou com maiores custos operacionais.

A Figura 16, que será apresentada abaixo elucida a velocidade deste tipo de corte em comparação com os métodos a laser e oxicorte, para o aço carbono e de acordo com sua espessura. As curvas indicadas com 1, 2, e 3 indicam o processo de corte por plasma aplicando as correntes 65 A, 200 A e 400 A, respectivamente. O número 4 indica o corte a laser com potência de 5 kW, já o número 5 indica o processo de oxicorte.

Figura 16 - Velocidade de corte do aço carbono



Fonte: Kashiwagi (2016).

Segundo DBC Oxigênio (2014) este processo possui suas limitações quanto a materiais não eletro condutores, além de perderem muito em qualidade de corte, precisão e produtividade em materiais muito espessos. Geralmente possuem seu limite operacional em 80mm, porém sua zona principal de trabalhabilidade ocorre em peças de menor espessura, com até 25mm.

4.4.2 Materiais e métodos

Para que o corte aconteça, é preciso fixar o material que será cortado, posicionar o bico da tocha na posição vertical em relação à peça de trabalho e começar o corte traçando as bordas.

Depois é só prosseguir com o corte de acordo com as medidas necessárias. No caso de o corte iniciar no meio da chapa ou para fazer furos, a técnica indicada é iniciar o corte com o bico inclinado.” Megaplasma (2017). É possível observar o processo sendo executado na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Chapa metálica recebendo recortes a plasma



Fonte: Megaplasma (2017).

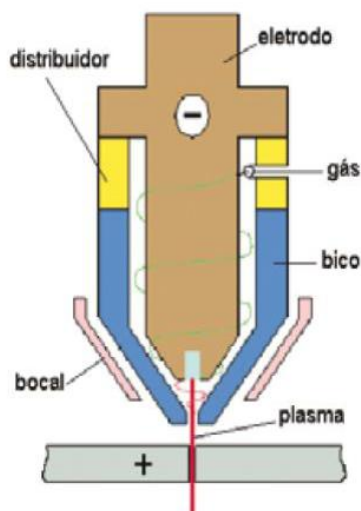
“Para realizar esse processo, são necessários alguns equipamentos de fornecimento de energia. São eles: uma fonte geradora de energia alimentado por eletricidade; gás para ser ionizado e ser o meio condutor do arco elétrico (ar comprimido, argônio, hidrogênio nitrogênio, oxigênio); uma tocha plasma e um grampo terra para fechar o circuito elétrico.” (MEGAPLASMA, 2017)

Uma das principais vantagens deste sistema em relação ao oxicorte, é a redução do risco de deformação por causa da propagação térmica na zona de corte e sua grande velocidade de corte Gariboldi e Previtali (2004).

“Lembrando que não é aconselhável utilizar o cortador de plasma em pequenos pedaços. Sua temperatura é tão elevada que, nesses casos, a peça de trabalho pode se deformar. Também gera mais economia de acordo com o gás aplicável.” Megaplasma (2017)

De acordo com Lima (2009), a tocha indicada na Figura 18 a seguir, serve de suporte para os consumíveis e fornece um fluido refrigerante (gás ou água) para estas peças, mantendo sua temperatura estável de modo a não prejudicar o processo.

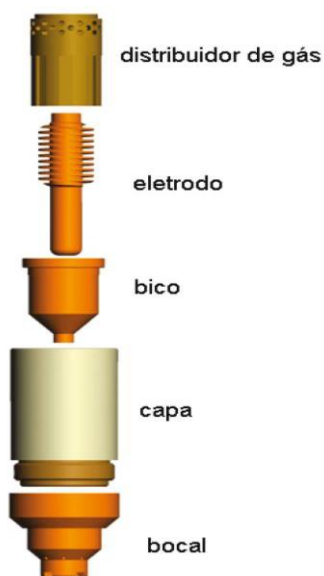
Figura 18 - Processo de corte por plasma



Fonte: Lima (2009).

O distribuidor ou difusor de gás é constituído de material isolante assim sendo resistente a altas temperaturas, uma de suas finalidades é de dar sentido rotacional ao gás. O eletrodo conduz a corrente até um inserto de háfnio que emite os elétrons para geração do plasma. O bico comprime o plasma e o guia para a peça a ser cortada. A capa tem função de manter os consumíveis alinhados e isolar a parte elétrica do bocal frontal. O bocal frontal guia o fluxo de jato de ar coaxial. Por ser refrigerado e isolado, o bocal pode ser apoiado à peça. A Figura 19 mostra a constituição de uma tocha plasma.

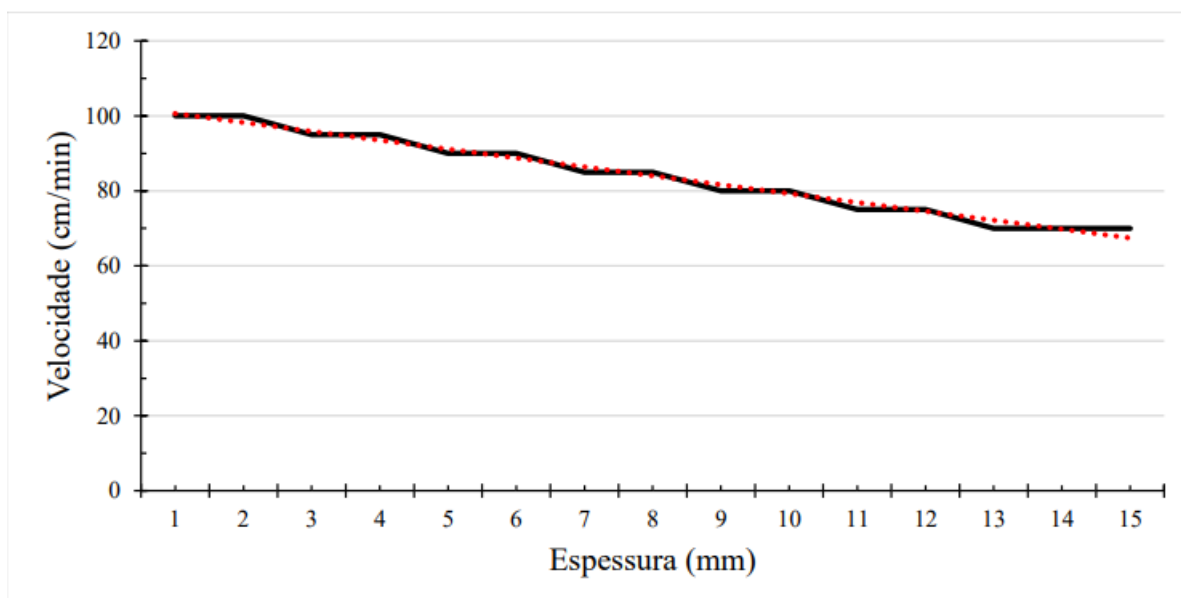
Figura 19 - Constituição de uma tocha plasma



Fonte: Lima (2009).

Mesmo com as variáveis deste processo Grenha (2015) nos apresenta uma relação de velocidade de recorte em relação a espessura da chapa (linha contínua) e uma curva de tendência (linha tracejada).

Figura 20 - Variação da velocidade com a espessura (plasma)



Fonte: Grenha (2015).

4.5 Laser

4.5.1 Definição

O laser é a abreviação de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” explica Redação indústria (2013), podemos traduzir para ampliação da luz por emissão estimulada de radiação. Esse sistema produz um feixe de luz concentrado e coerente através de estimulações eletrônicas ou transmissões moleculares para níveis mais baixos de energia em um meio ativo (sólido, líquido ou gasoso) segundo Redação indústria (2013).

Podemos observar na indústria de processamento de metais o corte a laser presente em áreas como:

- Automobilística (Montadoras e Autopeças);
- Transformação Mecânica (Máquinas, Equipamentos e Prestadores de Serviços);
- Eletroeletrônicos;
- Transportes (Rodoviário, Ferroviário, Metroviário, Marítimo, Aéreo);
- Implementos Agrícolas;

E entre outros. Redação indústria (2013) apresenta algumas das principais vantagens de se trabalhar com o corte a laser, algumas delas são únicas. É compreendido no texto como sendo o meio de corte térmico mais sofisticado que existe, possui inegavelmente uma das maiores precisões, sendo que seu feixe de corte é o menor dentre os meios térmicos, proporcionando excelência na superfície recortada, outro ponto de destaque é a baixa emissão de fumos ou resíduos do processo assim como a baixa emissão de ruídos, o que permite mais segurança no ambiente de trabalho, sua extrema versatilidade no processamento de materiais é um de seus diferenciais além da versatilidade que permite o recorte de figuras geométricas complexas com 2D ou 3D.

O corte consiste no processo de separação de matéria por meio de um raio laser guiado, moldado e concentrado explica Trumpf (2020). No momento em que encosta na peça o material aquece de tal forma que derrete ou vira vapor em questão de instantes, toda a potência do laser é direcionada para um feixe com, geralmente, menos de meio milímetro de diâmetro.

Segundo Trumpf (2020) o corte a Laser proporciona uma variedade de contorno ilimitada e realiza o recorte sobre uma ampla gama de materiais como: Aço; Alumínio; Aço

inoxidável; Chapas não ferrosas; Materiais não metálicos como: Plásticos; Vidro; Madeira ou cerâmica.

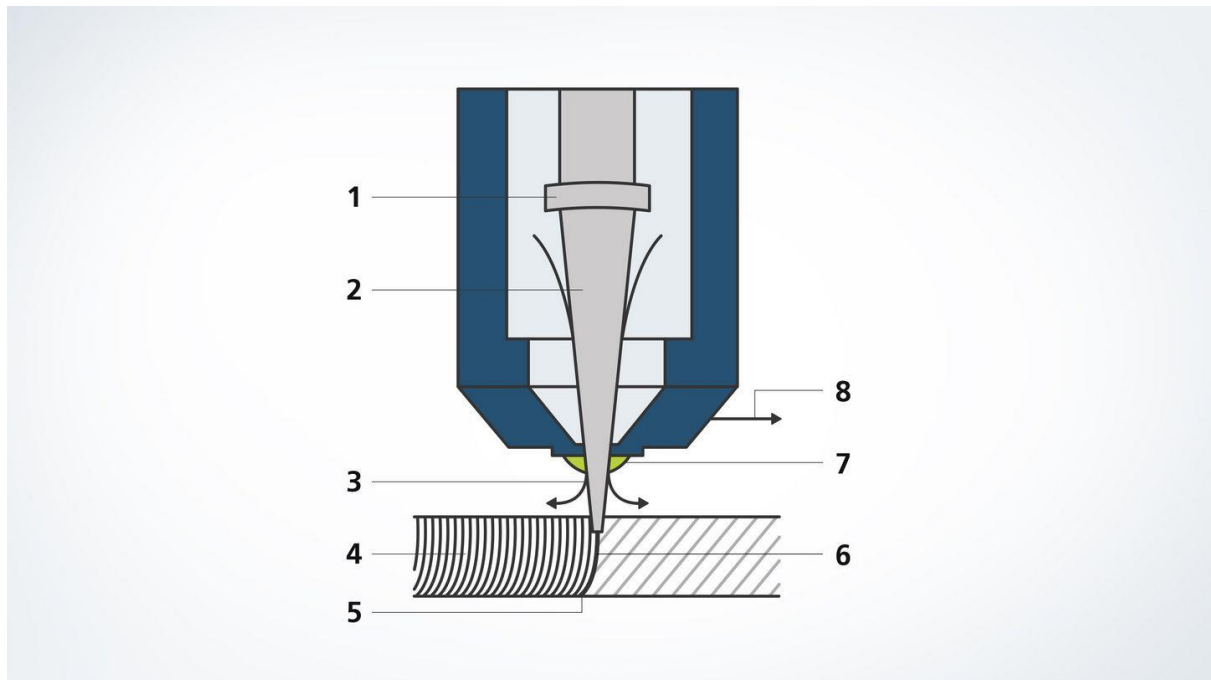
Outro ponto relevante levantado pela Redação indústria (2013) é a existência de diferentes tipos de lasers, essencialmente existem dois tipos que podem ser subdivididos, eles são, lasers sólidos e a gás, e sua principal diferença é seu meio ativo, um se utilizando de um ativo sólido e outro de um ativo gasoso, o mais utilizado é o laser de feixe gasoso por CO₂, mesmo sendo denominado desta forma o seu meio ativo é composto por Dióxido de Carbono, Nitrogênio e Hélio em diferentes quantidades, e sua principal vantagem frente ao meio sólido consiste em sua velocidade e valor baixo por watt despendido, isto impacta no investimento e produção.

Almeida (2017) apresenta as principais limitações deste processo, devendo conter especial atenção aos materiais refletivos. Segundo Otterbach (2011) o corte possui suas limitações em espessuras que variam de 0,10mm a 20 mm dependendo do material e especificações do equipamento.

4.5.2 Materiais e métodos

A descrição utilizada neste tópico é de autoria de Trumpf (2020), fornecedora alemã de equipamentos e tecnologias de recorte a laser e entre outros. Estas são a base de interação entre o raio laser focado e a peça a ser recortada, observado na Figura 21.

Figura 21 - O processo do corte a laser

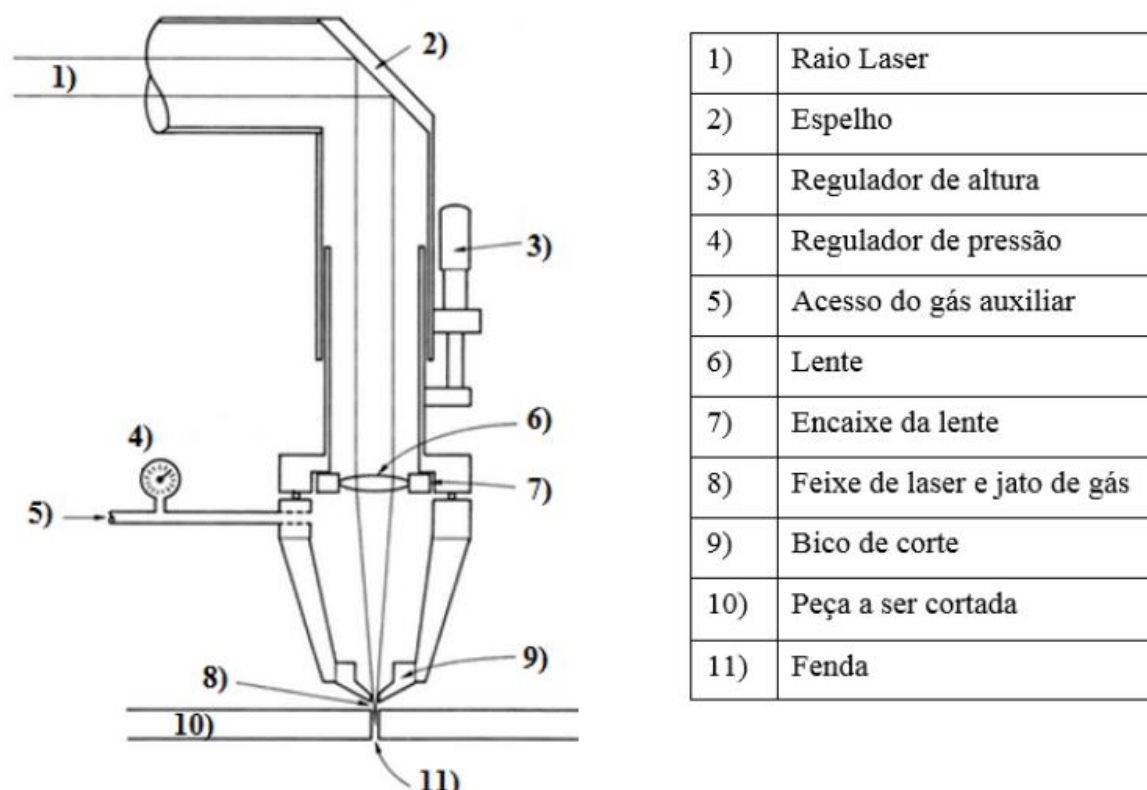


1. Óptica de focalização: ópticas de lentes e espelhos focalizam o raio laser no ponto de processamento
2. Raio laser: o raio laser encosta na peça e a aquece até que ela se derreta ou evapore.
3. Gás de corte: com ajuda do gás de corte, a fusão resultante é soprada para fora da fenda de corte. O gás sai do bico com o raio laser de forma axial.
4. Sulcos de corte: durante o corte a laser, o canto de corte forma um típico padrão de sulco. Em velocidades de corte baixas, esses sulcos ficam praticamente paralelos ao raio laser.
5. Massa fundida: o raio laser – luz laser focada – é guiado pelo contorno e derrete o material localmente.
6. Frente de corte: na peça, a fenda de corte não é mais larga do que o raio laser focalizado.
7. Bico: o raio laser e o gás de corte chegam ao material através do bico de corte.
8. Direção de corte: ao movimentar o cabeçote de corte ou a peça em uma determinada direção, é formada a fenda de corte.

Fonte: Trumpf (2020).

É possível acompanhar de maneira um pouco mais detalhada este processo pela apresentação esquemática de Grenha (2015) na Figura 22.

Figura 22 - Funcionamento de um sistema laser



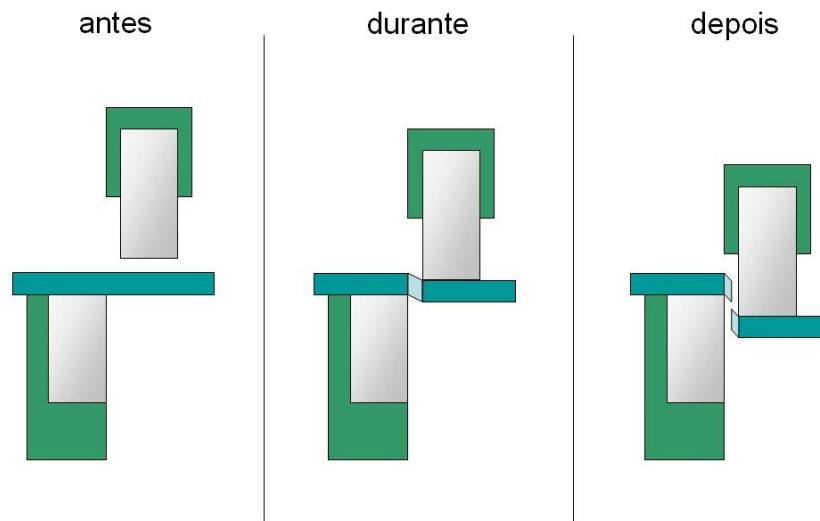
Fonte: Grenha (2015).

4.6 Guilhotina

4.6.1 Definição

Este processo ocorre a partir de uma força imposta sobre determinada área da peça, nada mais é do que uma ação mecânica imposta que provoca o rompimento do material, quando ultrapassando as tensões de cisalhamento do mesmo, sendo observado o processo na Figura 23. Este processo geralmente se enquadra na seção de estamparia de uma indústria, segundo Quadrilátero IND. de componentes para móveis (2017) estampagem industrial é um processo que se dá através da deformação ou recorte de lâminas ou chapas de metal em operação de prensagem a frio.

Figura 23 - Representação de corte por guilhotina



Fonte: Kondrasovas (2010).

As folgas entre a parte móvel do ferramental são muito importantes para que seja possível realizar cortes com a qualidade desejada, este item será desenvolvido no tópico de materiais e métodos.

Outros fatores envolvidos que são fundamentais para a execução de um bom corte, segundo Kondrasovas (2010):

- Controle do estado de afiação das facas;
- Alinhamento preciso das facas;
- Robustez estrutural da máquina adequada às solicitações de forças para o corte;
- Correta instalação da máquina no piso fabril.

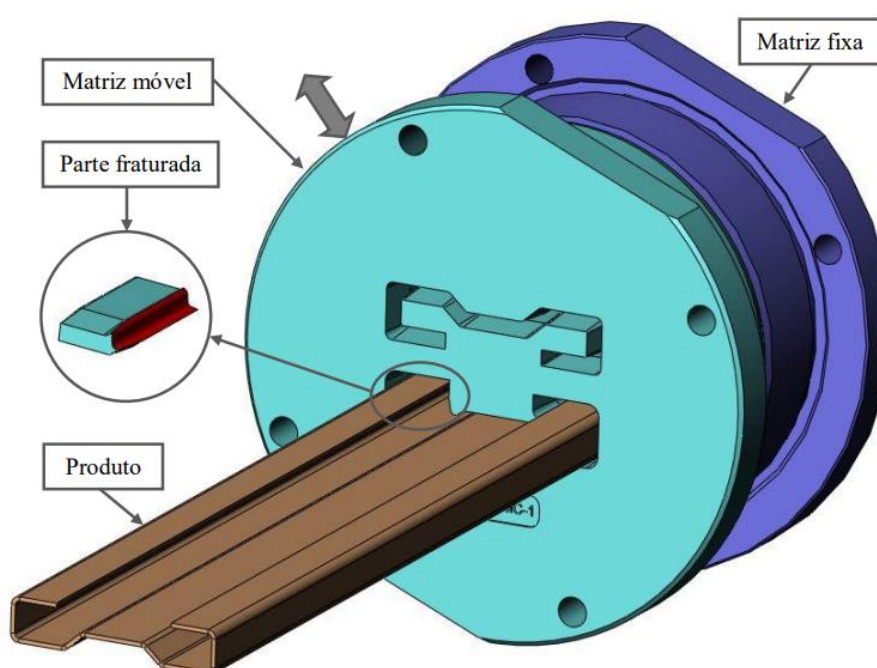
A má execução de qualquer um destes fatores implica no mau acabamento geométrico assim como na vida útil da máquina.

A produtividade desse processo pode ser otimizada observando fatores como a inclinação da faca, velocidade de corte e a capacidade de corte do equipamento para diferentes espessuras de chapa, segundo Kondrasovas (2010).

Ressalta-se que este processo gera resíduos sólidos limpos e recicláveis, se trata de um método que utiliza pouca energia elétrica de acordo com UNISTAMP (2019) e baixo custo de manutenção.

Uma de suas principais limitações é a realização de formas complexas e recortes que não sejam em zonas de bordo, para os equipamentos convencionais, porém existem diferentes tipos de matrizes que possibilitam um recorte fixo como apresentado na figura 21, fazendo com que este seja um processo de baixa adaptabilidade.

Figura 24 Região crítica de projeto



Fonte: Sirtoli (2013).

4.6.2 Materiais e métodos

Para que este tipo de corte seja realizado é necessário a utilização de uma guilhotina ou tesoura como o da Figura 25, a seguir.

Figura 25 - Guilhotina Newton



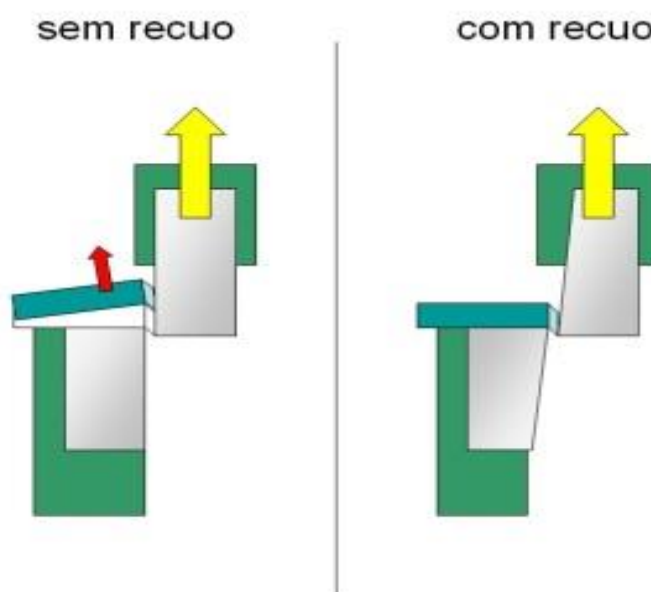
Fonte: Kondrasovas (2010).

Neste tipo de máquina, geralmente, a faca inferior é presa na base do equipamento (parte imóvel) e seu conjunto na parte superior (parte móvel).

A guilhotina, é uma ferramenta que realiza cortes lineares sobre as peças, uma de suas principais características é a inclinação de sua faca, sem esta seria necessário a aplicação de forças muito maiores para a realização do corte, como ocorrem nos demais processos de corte em estamparia, que são realizados por prensas ou puncionadeiras (método já descrito neste trabalho).

Observa-se que quanto maior a inclinação das facas, como visto na Figura 26, menor é a força imposta para a realização do corte, porém mais demorado se torna o processo, então para que se obtenha uma maior produtividade é preciso conciliar a inclinação das facas e velocidade do processo, isto resulta em dois fatores principais, são eles a força que deverá ser imposta e o desgaste do equipamento.

Figura 26 - Geometria das ferramentas de corte



Fonte: Kondrosovás (2010).

Para a realização de cortes é importante observar as especificações recomendadas para os espaçamentos entre as lâminas de corte, uma folga inadequada em excesso produzirá rebarbas, já a ausência de folgas danifica os elementos da ferramenta de corte.

A empresa Newton, tradicional fabricante de guilhotinas, situada em Limeira - SP, traz, na Tabela 1 - Relação das folgas de corte comumente utilizadas, as especificações das folgas que devem ser utilizadas em seus equipamentos de acordo com o tipo de material e espessura da chapa. A regulação da folga deverá ser de 8% da espessura se este for um aço carbono e 6% se este for aço inoxidável. Por exemplo se uma chapa de aço carbono tiver espessura de 9mm, a folga ideal é de 0,72mm.

Tabela 1 - Relação das folgas de corte comumente utilizadas

Espessura da chapa (mm)	folga (mm)
de 0,8 a 2,5	0,1
de 2,5 a 4,0	0,2
de 4,0 a 6,0	0,35
de 6,0 a 8,0	0,45
de 8,0 a 10,0	0,6
de 10,0 a 13,0	0,8

Fonte: Adaptado Kondrasovas (2010).

Além dos pontos citados anteriormente é importante ressaltar outros acessórios extremamente importantes para a realização de cortes precisos e seguros de acordo com Kondrasovas, 2010, como:

- Batentes para alinhamento da peça a ser cortada;
- Alinhadores a laser;
- Barreiras de proteção das partes móveis;
- Acionamento automático (com pedal ou botões bimanuais).

4.7 Serra fita

4.7.1 Definição

Este método realiza recortes em perfis metálicos por meio de uma serra metálica que gera cavacos em sua extremidade.

A lâmina deve proporcionar dureza adequada e baixa condutividade térmica, tem sua composição baseada em um revestimento de alta dureza, que confere proteção a todos os dentes de sua estrutura, contra desgastes e contra altas temperaturas.

Segundo Diserraço (2020) o corte realizado por serra fita proporciona:

- Cortes perfeitos e sem rebarbas;

- Perfil de dente com resistência a vibrações e impactos;
- Composição fundamentada em revestimentos de alta dureza;
- Adaptabilidade para utilização em aço mole.

Porém para a realização deste método existem algumas constatações básicas a serem feitas antes de se iniciar o processo, como:

- Tipo de material que será cortado;
- Dimensões do material;
- Variações das seções de corte que deve ser seguida;
- Demanda diária, mensal ou anual;
- Acabamento superficial esperado.

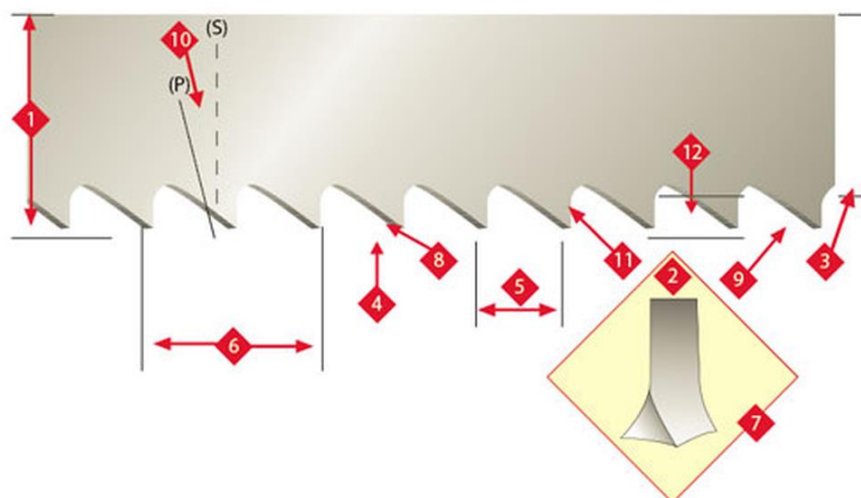
Estas são algumas das questões essenciais publicado na Revista do aço (2017) para que seja possível optar pelas melhores dimensões e serras para realizar o recorte.

Zilli (2011) apresenta algumas das principais limitações deste processo, a primeira diz respeito a qualidade do corte para equipamentos manuais que estará associada com a habilidade do operador, a velocidade de operação se comparada a outros métodos pode ser considerada lenta, principalmente para recortes com formas mais complexas, até mesmo para os equipamentos automatizados. Possui como ponto chave a dureza do material a ser recortado que deve ser inferior a serra de recorte.

4.7.2 Materiais e métodos

Este método é relativamente simples e consiste no recorte de um perfil por meio da fricção causada por uma serra de aço, Figura 27, para isto esse método necessita de um equipamento de corte para serra fita horizontal ou equipamento adequado para serra fita circular, mesa para apoio e fixação da peça e serra específica para corte.

Figura 27 - Seção de serra fita horizontal



Fonte: RML (2021).

A lâmina de serra típica tem uma miríade de características geométricas.

1. **Largura** - Distância entre a ponta da aresta de corte e a parte de trás da lâmina
2. **Espessura** - Medida feita no corpo (medidor)
3. **Corpo da lâmina** - Distância da parte de trás da lâmina até a parte inferior da garganta
4. **Dente** - Parte cortante da lâmina
5. **Passo do dente** - Distância da ponta de um dente até a próxima
6. **TPI** - Número de dentes por polegada.
7. **Fixação do dente** - Dobramento dos dentes, para a direita ou esquerda, para permitir a folga da lâmina através do corte (ou corte)
8. **Face do dente** - Superfície do dente onde o chip é formado
9. **Parte posterior do dente** - Superfície angular do dente oposto a face do dente
10. **Ângulo de inclinação do dente** - Positivo (P) ou reto (S), o ângulo da face do dente medido a partir de uma linha perpendicular à parte de trás da lâmina
11. **Garganta** - Área curva entre dois dentes 12.

A seguir, na Figura 28, é possível observar alguns exemplos de máquinas de serra fitas horizontais.

Figura 28 - Maquinário serra fita horizontal



Fonte: RML Máquinas e Equipamentos (2022).

4.8 Corte por jato de água

4.8.1 Definição

O corte por jato de água é um processo de corte a frio que provoca o recorte tanto de perfis metálicos como de demais objetos por meio de um jato de água projetado em altíssima velocidade, as vezes associado a um abrasivo, segundo Almacam (2018), empresa de softwares que possibilitam a automatização e otimização de processos de recorte. O corte por jato d'água enquadra-se no grupo de energia mecânica, onde a força de impacto exercida por um jato de água de alta pressão na superfície de contato do material supera a tensão de compressão entre as moléculas, seccionando o mesmo de acordo com Joaquim e Ramalho (2013)

O corte por jato de água é indicado para todos os materiais que não podem ser cortados por processos térmicos ou mesmo para peças metálicas que por especificações técnicas ou de projeto não podem ter suas propriedades mecânicas alteradas durante seu corte.

Algumas das vantagens deste processo são, segundo Almacam (2018), a nitidez do corte (a evitar rebarbas) e sua altíssima precisão da ordem de um décimo de milímetro, este método não gera deformações na peça em seu processo de recorte, além de se tratar de um processo rápido que possibilita o recorte de chapas de grande espessura.

A escolha do tipo de composição (água pura ou água com abrasivo) dependerá do tipo de material a ser cortado, quando utiliza água pura limita-se ao corte de materiais não metálicos, contudo, a adição de finas partículas abrasivas no fluxo de água estende a utilização do processo

para o corte de materiais de elevada dureza e densidade segundo Joaquim e Ramalho (2013). Outro detalhe sobre o processo é que o corte por jato d'água é capaz de cortar materiais de 0,8mm a 100mm e pode até aumentar a espessura dependendo do material. Essa espessura inferior é indicada devido ao fato do corte gerar uma tensão sobre a superfície da chapa e se a mesma for muito fina, pode acabar sofrendo uma deformação física.

Este método de corte tem uma grande abrangência de materiais uma vez que ele é um corte a frio, ou seja, permite o corte de materiais sensíveis a temperatura como plásticos, telhas e compostos. O corte por jato de água dificilmente é limitado pela grossura do material em questão. Geralmente, é possível realizá-lo em peças ou materiais com até 18 polegadas ou 45 cm segundo Dustre (2022), distribuidora de ligas especiais e fabricação de peças e equipamentos sob medida.

De acordo com Almeida (2017), um dos pontos que implica em dificuldades ou limitações neste processo é a dureza do material, visto que a força necessária para gerar a ruptura pode se tornar inalcançável ou inviável a depender do tipo de equipamento em questão.

4.8.2 Materiais e métodos

Almacam (2018) explica algumas características de como ocorre o processo de corte por jato d'água em seus estudos:

“O corte com jato de água é um processo de corte a frio que utiliza um jato de água projetado a altíssima velocidade, às vezes associado a um abrasivo. A água é inicialmente levada a uma pressão de 4.000 a 6.500 bars e depois a água pressurizada passa através de um orifício de diâmetro extremamente pequeno (de 0,08 a 0,4 mm). A velocidade do jato de água, em função da pressão, pode alcançar 1.200 m/s. As partículas de água projetadas que atingem a superfície do material o cortam de maneira limpa e precisa. A adição de um abrasivo é necessária para cortar materiais duros, em particular metálicos como aço, alumínio e entre outros).” (ALMACAM, 2018)

Na Figura 29 é possível observar o equipamento de corte por jato d'água executando o recorte de uma peça.

Figura 29 - Recortes feitos por máquina de corte por jato de água



Fonte: Almacam (2018).

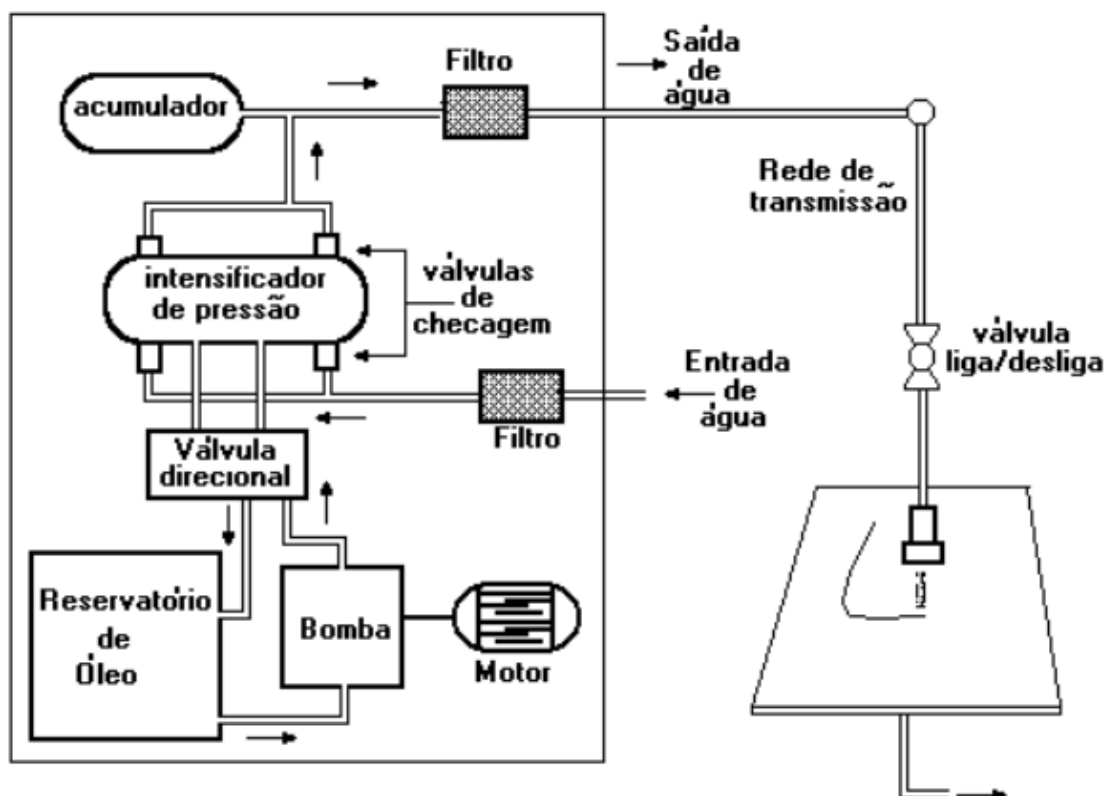
O fluxo de água expelido pelo equipamento varia entre 20-40 l.p.m, com pressão entre 2500-3000 “bares”.

É possível utilizar água pura no equipamento ou água com algum tipo de abrasivo, como os listados a seguir:

- Sílica,
- Carbetto de silício,
- Óxido de alumínio,
- Granada,
- Coríndon.

“Existem basicamente duas maneiras de se gerar o jato de água, uma bomba de pistão, ou uma bomba intensificadora ou conjunto dessas. Normalmente para o corte utiliza-se bombas intensificadoras.” (JOAQUIM E RAMALHO, 2013). O esquema de um equipamento para corte por jato de água é apresentado na Figura 30 abaixo.

Figura 30 - Esquema básico de um equipamento de corte por jato de água



Fonte: Joaquim e Ramalho (2013)

A análise feita por Joaquim e Ramalho (2013) mostra que o corte por jato d'água apresenta as seguintes vantagens:

- Facilidade de cortar qualquer material
- Sem risco de radiação
- Sem depósito de material sobre a peça cortada
- Largura de corte estreita
- Ausência de contato físico
- Baixa entrega térmica

Porém, para manter a qualidade de corte em nível elevado, os equipamentos desse tipo de corte apresentam alto investimento inicial, baixa potência disponível, excesso de ruído, risco de acidentes com água e baixa velocidade se comparado aos cortes por plasma e laser.

5 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE CORTE E FURAÇÃO DE PERFIS

O aço sai das usinas com diferentes formatos, tamanhos e finalidades, independentemente de sua aplicação segundo Carvalho (2018), todos passam por um processo de corte até chegarem ao seu formato final.

É importante ressaltar que os produtos ou peças escoadas, podem ser classificados em função da espessura e do grau de complexidade dos contornos. As espessuras são classificadas segundo Urtado, Lima e Baino (2013) em finas até 6,4 mm; médias entre 6,4 e 32mm e grossas acima de 32mm. O grau de complexidade é em função do raio dos contornos, sendo simples os contornos com raio superior a 15mm, média complexidade os contornos com raios entre 5 e 15mm e alta complexidade os contornos com raio inferior a 5mm.

Segundo o Engenheiro de aplicação da Hypertherm (uma das maiores empresas de metalurgia com foco em sistemas de corte), Felipe Maddi o método mais utilizado atualmente para corte e furação de perfis metálicos é o plasma, este apresenta vantagens competitivas em relação aos demais em termos de velocidade, qualidade de corte e consumo de energia, segundo ele este corte atende a necessidade dos clientes na maioria dos casos, ele revela que este método é utilizado em 80% dos casos da empresa, alertando para as restrições do corte como espessura da chapa e tipo de material, como observamos na descrição do método acima e será apresentado em algumas das comparações a seguir.

De acordo com Carvalho (2018) a escolha do corte para o aço geralmente é definida pelo engenheiro e pelo cliente que busca por qualidade, agilidade e custo-benefício, geralmente estes são: laser, plasma, oxicorte e/ou jato d'água.

Considerando essas informações, foi definido como melhor abordagem para esse trabalho, a realização de comparações entre os quatro métodos mais utilizados, citados no paragrafo anterior.

Para a realização das 6 comparações a seguir utilizaremos 4 subdivisões são estas:

Características dos processos: Detalhes sobre os objetos de estudo, delimitado os pontos de atuação dos cortes, assim como suas principais características;

Economia energética: Aponta em grau comparativo qual método exige mais ou menos energia elétrica para seu funcionamento.

Qualidade: Adotaremos o conceito do engenheiro Joseph M Juran, que publicou em 1951 o “Quality Control handbook” (Manual do Controle de qualidade) para apontar em grau comparativo a qualidade de corte para cada método. Joseph adota duas definições para qualidade:

- A. Qualidade são aquelas características dos produtos que atendem às necessidades dos clientes e, portanto, promovem a satisfação com o produto;
- B. Qualidade consiste na ausência de deficiências.

Viabilidade Econômica: Aponta quando possível, em grau comparativo, qual método possui melhor custo benefício, produtividade e/ou custos iniciais e operacionais.

5.1 Plasma x Oxicorte

É importante destacar para esta análise que os processos são analisados em condições distintas que proporcionam grande desvantagem competitiva para o oxicorte, visto que os dados apresentados para o corte a plasma são oriundos de um processo automático já os dados do oxicorte provem de operações manuais.

5.1.1 Características dos processos

Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens bem características, segundo Soares e Nascimento (2016) algumas das principais vantagens do modelo operacional do oxicorte é a não necessidade de energia elétrica para sua aplicação, o baixo investimento inicial e sua facilidade operacional.

É importante levar em consideração que o oxicorte é utilizado para recortar apenas metais ferrosos com alto teor de ferro segundo Carvalho (2018) e costuma ser utilizado para cortar chapas de mais de 2 polegadas de espessura, não sendo indicado para metais não ferrosos como aço inoxidável e alumínio.

Em contrapartida o modelo de corte a plasma possui vantagens em termos produtivos por se tratar de um método que realiza cortes de maior precisão e rapidez, este método possui uma pequena zona termicamente afetada (ZTA), sendo assim tem melhor acabamento, além de ser capaz de recortar qualquer metal que seja condutor de eletricidade, em comparação com o

oxicorte que não realiza corte em metais não ferrosos, alumínio ou cobre, segundo Soares e Nascimento (2016)

5.1.2 Economia energética

O processo de oxicorte possui vantagem neste quesito, visto que não é preciso uma fonte de energia elétrica para a execução deste processo, embora se trate de um processo mais demorado e para a realização de qualquer processo industrial será demandado energia elétrica como: Luz, ar-condicionado, sistemas operacionais e entre outros, o processo de recorte por oxicorte não se utiliza de energia elétrica, salvo em casos onde é utilizado CNC para a realização do recorte, porém o corte a plasma na maioria dos casos se utiliza deste tipo de automatização, além da energia despendida para que seja possível a realização do processo que ocorre dentro da tocha, segundo Hypertherm (2016) o processo a plasma despende cerca de 24kW/hora.

5.1.3 Qualidade

Segundo Soares e Nascimento (2016) o corte a plasma proporciona cortes mais precisos e limpos em relação ao oxicorte e os parâmetros serão apresentados a seguir.

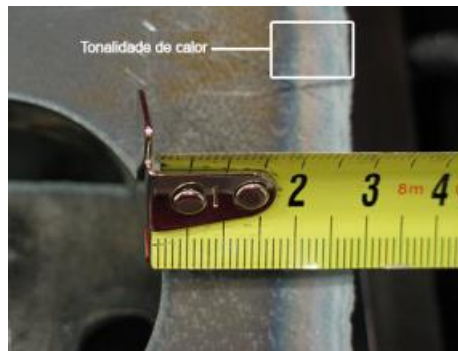
Soares e Nascimento (2016) explica que as tecnologias a plasma mais recentes eliminam a conicidade de forma que, ao invés de produzir furos que se estreitam, os furos apresentam diâmetros uniformes do início ao fim. Ele continua, com a zona afetada pelo calor, sendo que a borda afetada se torna potencialmente inadequada para operações secundárias de fixação, ambos os métodos afetam zonas de borda, porém o corte a plasma Figura 31 com uma profundidade bem menor se comparado com o oxicorte Figura 32, isto gera maior quantidade de retrabalho, demandando maior quantidade de tempo para o acabamento do material.

Figura 31 - Tonalidade de calor após recorte por plasma (2mm)



Fonte: Soares e Nascimento (2016).

Figura 32 - Tonalidade de calor após recorte por oxicorte (>10mm)



Fonte: Soares e Nascimento (2016).

Vamos agora a comparação de resíduos gerados em ambos os processos, no caso de recortes de metais estes resíduos se chamam escória, sendo assim Soares e Nascimento (2016) realizam algumas comparações e nos trazem algumas constatações como:

- Ambos os processos geram escória;
- Oxicorte por afetar uma área maior de calor, como na Figura 33, gera mais escória;

Figura 33 - Escória gerada pelo processo de oxicorte



Fonte: Soares e Nascimento (2016).

- Oxicorte por ser um processo mais lento faz com que a escória gerada se solidifique durante o processo, dificultando sua remoção;
- Corte a plasma oferece um corte isento de escória até determinadas espessuras;
- A escória gerada pelo plasma Figura 34 é de fácil remoção, pois está só se une com outro material em nível elevado de calor e este método gera uma zona menor afetada pelo calor do processo.

Figura 34 - Escória gerada pelo processo de plasma



Fonte: Soares e Nascimento (2016).

Podemos observar que a escória gerada pelo processo de oxicorte é maior assim como seu trabalho de remoção e acabamento, fazendo com que o tempo para a produção de uma mesma peça seja elevado em relação ao corte a plasma.

A partir destas e outras análises Soares e Nascimento (2016) nos trazem uma comparação entre tais métodos com alguns dos principais parâmetros colocados em comparação na Tabela 2.

Tabela 2 - Oxicorte x Plasma

Qualificativa	Oxicorte	Plasma
Tipo de material recortado	Aço carbono	Todos os metais eletrocondutores
Qualidade de corte	3	5
Deformações	4	2
Precisão/repetibilidade	3	4
Possibilidade de automação	3	5
Investimento inicial	2	4
Custo de manutenção	1	1
Periculosidade	2	1

*De 1 (Baixo) a 5 (Alto)

Fonte: Adaptado de Soares e Nascimento (2016).

Adolpho e Lualdi (2008) trazem uma referência próxima ao que é observado na tabela anterior, contudo as tecnologias se desenvolveram muito no período entre as duas análises, porém ainda é possível observar certa similaridade entre seus resultados assim como exemplificado no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação entre os métodos de corte laser x oxicorte

Oxicorte	Baixa qualidade; Baixa precisão; Alta reprodutibilidade.	Baixa velocidade; Baixo investimento inicial; Alto custo operacional	Acima de 19 mm;
Plasma	Média qualidade; Média precisão; Baixa reprodutibilidade.	Alta velocidade; Médio investimento; Baixo custo operacional .	5mm - 50mm

FONTE: Adaptado de Adolpho E Lualdi (2008).

5.1.4 Viabilidade econômica

Esta análise será feita de acordo com os parâmetros apresentados no artigo de Soares e Nascimento (2016), analisando a alimentação, os consumíveis e os gases, os valores apresentados são em dólares para os parâmetros de 2016 (1 US\$ = 3,90 R\$).

Tabela 3 - Comparação custo operacional plasma x oxicorte

	Plasma	Oxicorte
Custo do corte/hora em (US\$)		
Consumíveis	16,77	0,06
Alimentação	4,00	0,00
Gás	7,90	6,20
Custo operacional/hora	28,67	6,26
Nº de peças produzidas/hora	222	25
US\$/peça (Custo por hora dividido pelo número de peças)	0,13	0,25

Fonte: Adaptado de Soares e Nascimento (2016).

5.2 Plasma x Laser

5.2.1 Características dos processos

Segundo Ficaço Comércio e Indústria de Aço e Ferro LTDA. (2015) ambas se utilizam de tecnologia CNC (*computer numerical control*) para a realização de seus cortes, esta tecnologia garante flexibilidade realizando diferentes tipos de recorte em ambos os métodos. Estas tecnologias podem realizar cortes principalmente em chapas de metal e aço com espessuras de 1 a 80mm com velocidades de até 20m por minuto. O corte a plasma é mais recomendado para chapas que possuem de 11 a 25mm de espessura, isto se aplica em termos de velocidade, qualidade de corte e consumo de energia.

Ficaço Comércio e Indústria de Aço e Ferro LTDA. (2015) afirma que o corte a laser possui capacidade de recortar materiais que o plasma não é capaz como acrílicos e madeira, além de ser mais eficiente para o recorte de chapas que variam de 0,5 a 10mm de espessura, isto se aplica para termos de velocidade (podendo alcançar até 25 metros/minuto), acabamento e consumo de energia.

Conclui-se pelo Quadro 2, elaborado por Almeida (2017) que a depender do tipo de material e espessura da chapa de aço existe uma opção mais viável em termos de velocidade, acabamento e consumo de energia.

Quadro 2 - Comparação entre os diferentes métodos de corte

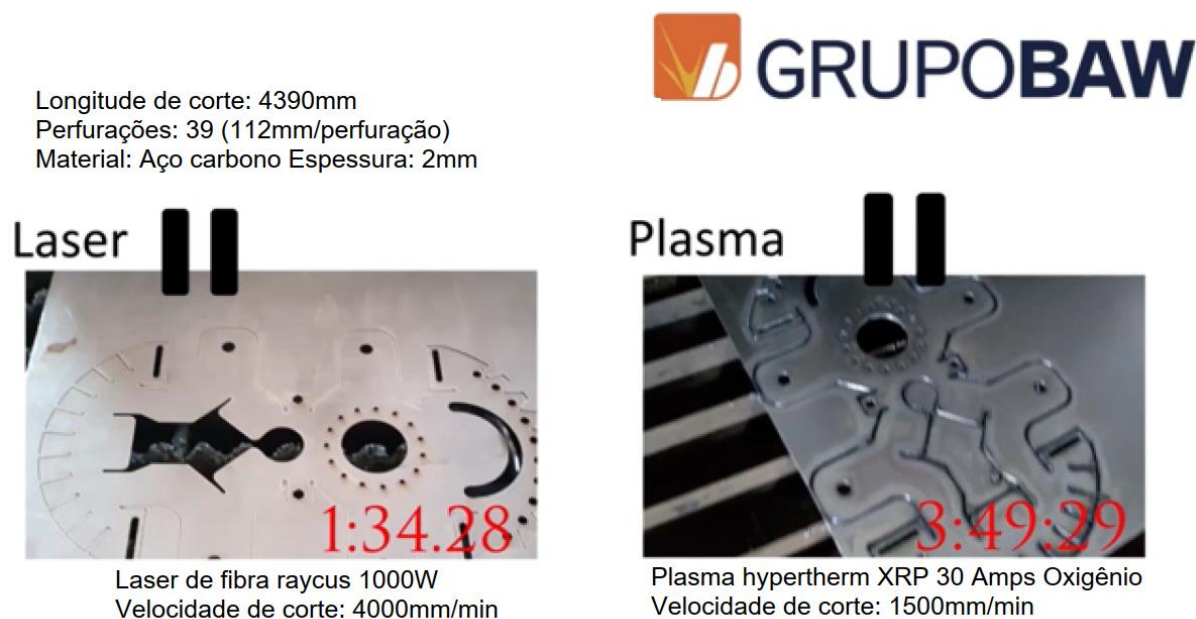
	Laser	Jato de Água	Plasma
Fonte de energia	Feixe laser	Bomba de alta pressão	Feixe de gás plasma
Processo de corte	Absorção de luz de alta densidade de potência aquece o material. Gás de assistência pressurizado expelle o metal derretido através da fenda de corte	Jato de água a alta pressão com ou sem abrasivo corta o material.	Jato de gás plasma ionizado aquece o material e expelle o metal derretido pela fenda de corte.
Processamento 3d	Sem problema	Difícil e não recomendado	Difícil
Metais processados	Todos com especial atenção ao refletivos	Todos	Apenas metais eletrocondutores
Ponto-Chave	Propriedades óticas dos materiais refletores em comprimentos de onda de 10,6um a 1,06um	Dureza do material	Condutividade elétrica
Largura da fenda relativamente à largura fenda feita pelo laser	1;1	3;1	4;1
Segurança Olhos	Laser CO2: Óculos de segurança Laser de fibra: Necessário total isolamento	Óculos de proteção e proteção contra contato com jato d'água	Óculos de proteção
Segurança Ouvido	Baixo nível de dB	Acima 85dB - proteção auditiva necessária	Baixo nível dB
Manutenção	Baixa limpeza necessária	Alta limpeza necessária	Baixa limpeza necessária

Fonte: Adaptado de Almeida (2017).

5.2.2 Economia energética

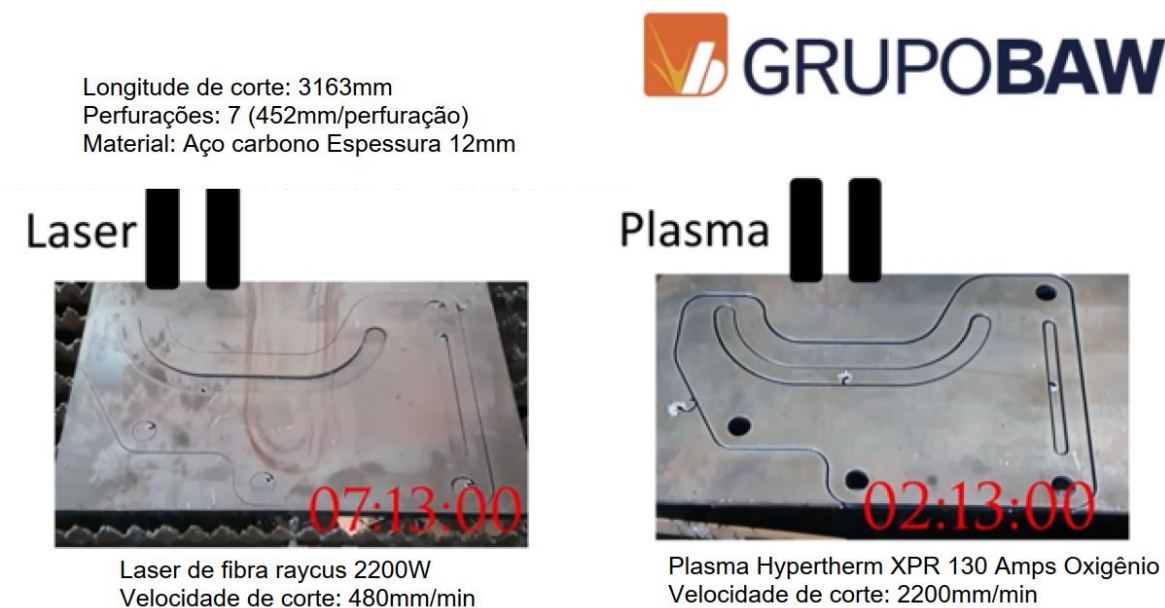
A análise sobre a economia energética depende da especificação do material a ser recortado. De acordo com estudo de caso realizado pelo GRUPO BAW em 2020 (dados mostrados nas Figura 35 e Figura 36) placas de 0,5mm a 3 mm tendem a ter um menor custo operacional e maior velocidade de trabalho pelo método a laser, é importante ressaltar que ambas se utilizam de energia elétrica em escala proporcional em relação a espessura da chapa a ser recortada, porém por concluírem o processo em tempos diferentes a energia despendida em cada chapa é superior ou inferior a depender das especificações do material recortado.

Figura 35 - Comparação, tempo de corte, laser x plasma (Espessura de chapa 2mm)



Fonte: adaptado Grupo Baw (2020).

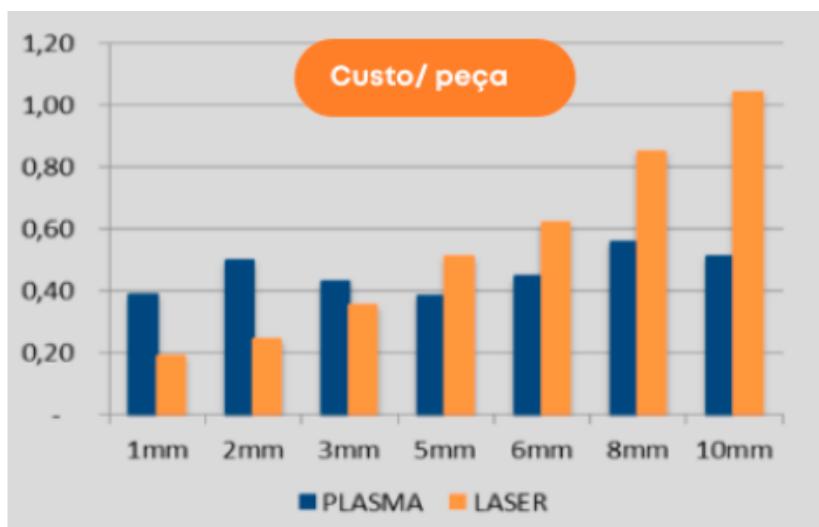
Figura 36 - Comparação, tempo de corte, laser x plasma (Espessura de chapa 12mm)



Fonte: adaptado Grupo Baw (2020).

O estudo também apresenta um comparativo em relação aos custos operacionais envolvendo diferentes espessuras de chapa, estes custos envolvem os insumos incluídos no processo como gases e energia despendida os resultados podem ser observados na Figura 37.

Figura 37 - Comparação de custo operacional, laser x plasma



Fonte: Grupo Baw (2020).

É possível observar que para chapas de 1mm de espessura o custo operacional do corte a plasma é o dobro do corte a laser, a situação se inverte para chapas com 10mm de espessura. Podemos observar algo parecido em relação ao tempo despendido para a realização de um mesmo processo em placas de 2mm e 12mm, onde o tempo necessário pelo método a laser para recortar chapas de 2mm é cerca de 2.5 vezes menor que o corte a plasma, o processo se inverte para chapas de 12mm.

5.2.3 Qualidade

Segundo Almeida (2017) em geral o processo que possui maior precisão em seu corte, proporcionando assim maior nível de acabamento e reduzindo possíveis retrabalhos além de possibilitar o recorte a uma gama maior de materiais é o corte a laser, porém isto pode oscilar a depender do tipo de material e espessura da chapa.

Devemos levar em consideração que o corte a plasma é um dos cortes que possui maior velocidade, mantendo-se a precisão e qualidade, como podemos observar na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentada por Adolpho e Lualdi (2008).

Tabela 4 - Comparação entre os métodos de corte a plasma x laser x Jato d'água

Espessura	Jato de água (27kW)	Laser CO2 (4kW)	Plasma N2/H2O (14-16kW)
6mm	0,32 m/min	2,1 m/min	2,7 m/min
12mm	0,13 m/min	0,75 m/min	1,4 m/min

FONTE: Adaptado de Adolpho e Lualdi (2008).

No estudo realizado foi comparado o corte em chapas de 6 e 12 mm de inox nos processos de corte por jato de água, laser e plasma, apenas levando-se em consideração a velocidade.

5.2.4 Viabilidade econômica

Utilizando como referência a análise comparativa feita por Adolpho e Lualdi (2008), Quadro 3, observamos algumas das principais características de cada processo para os moldes de 2008, muitas destas continuam condizendo com a realidade, salvo a baixa reprodutibilidade do processo por plasma.

Quadro 3 Comparação entre os métodos de corte a plasma x laser

Laser	Alta qualidade; Alta precisão; Alta reprodutibilidade.	Alta velocidade; Alto investimento; Médio-alto custo operacional.	1mm - 12mm
Plasma	Média qualidade; Média precisão; Baixa reprodutibilidade.	Alta velocidade; Médio investimento; Baixo custo operacional.	5mm - 50mm

FONTE: Adolpho e Lualdi (2008).

Por meio desta é possível entender o campo de disputa entre estes dois métodos, visto que quando são colocados frente a frente a qualidade e precisão tendem a favorecerem o corte a laser, porém conforme comentado anteriormente é muito importante a análise do tipo de material a ser recortado e sua espessura, tanto o investimento inicial como o custo operacional

favorecem o método de corte a plasma, fazendo com que muitas empresas optem por investir neste tipo de equipamento.

5.3 Jato d'água x Plasma

5.3.1 Características dos processos

Os dois métodos têm capacidade de se integrarem a tecnologia CNC. A versatilidade de ambos pode se enquadrar em vários fatores. Devido ao uso de água e um componente abrasivo, o corte com jato d'água pode abranger uma gama de materiais, que o corte a plasma não pode devido a condutividade de cada material, segundo Krajcarz (2014).

Outra fator relevante é o baixo impacto ambiental em relação ao corte a plasma, uma vez que o composto (água + abrasivo) pode ser reutilizado/reciclado, o corte a plasma, dependendo do material cortado, pode liberar gases, pó, fumaça e borra (aço derretido) de acordo com Krajcarz (2014). Enquanto o processo de corte por jato d'água não libera gases ou resíduos perigosos ao ambiente de trabalho.

O corte por jato d'água é capaz de cortar materiais de 0,8 - 100mm e pode até aumentar a espessura dependendo do material. Já o corte a plasma varia entre 0,1 - 120mm, tendo uma melhor recomendação de mercado, com viés de custo benefício para metais de até 20mm de espessura.

Segundo o estudo promovido por Adolpho e Lualdi (2008) comparando o corte de 6 e 12 mm em inox nos processos jato de água, laser e plasma, apenas levando-se em consideração a velocidade temos os seguintes dados na Tabela 5:

Tabela 5 - Comparação entre velocidades de cortes para peças com diferentes espessuras, para o corte a plasma (14-16KW) e corte por jato d'água (27kW)

Espessura	Jato de água (27kW)	Laser CO2 (4kW)	Plasma N2/H2O (14-16kW)
6mm	0,32 m/min	2,1 m/min	2,7 m/min
12mm	0,13 m/min	0,75 m/min	1,4 m/min

FONTE: Adaptado de Adolpho e Lualdi (2008).

Tais dados mostram que o corte por jato d'água é mais lento que o corte por plasma.

Além de dados de velocidade, Adolpho e Lualdi (2008) comparam qualitativamente após seus estudos, a precisão, reprodutibilidade, qualidade, valor de investimento e custo operacional. Tais dados podem ser observados no Quadro 4, a seguir.

Quadro 4 - Comparações feitas entre jato d'água e corte a plasma

Jato de água	Alta qualidade; Alta precisão; Média-alta reprodutibilidade.	Baixa velocidade; Médio-alto investimento; Alto custo operacional.	1mm - 50mm
Plasma	Média qualidade; Média precisão; Baixa reprodutibilidade.	Alta velocidade; Médio investimento; Baixo custo operacional.	5mm - 50mm

FONTE: Adaptado de Adolpho e Lualdi (2008).

5.3.2 Economia energética

A análise sobre a economia energética depende da especificação do material a ser recortado.

Cabe uma análise da finalidade da empresa, ao planejar a compra do equipamento, objetivando suas prioridades.

Segundo De Ataíde *et al.* (2020), o método de corte por jato d'água tem um consumo aproximado de 0,15kW/peça produzida. Já o método de corte por plasma, cerca de 24kW/hora segundo Hypertherm (2016), levando em consideração que o processo produz cerca de 222 peças em uma hora chegamos a 0,11kW/peça produzida.

5.3.3 Qualidade

O corte por jato d'água gera bordas arredondadas sem rebarbas, possuindo alta qualidade em seu acabamento final. Já o corte a plasma apresenta uma zona termicamente afetada (ZTA) que pode requerer acabamento após o corte, Krajcarz (2014).

Em relação a precisão do corte, o método a plasma apresenta precisão menor de 1mm, já o corte com água por não produzir deformação térmica, acaba atingindo precisões de $\pm 0,1\text{mm}$ podendo chegar a $0,02\text{mm}$ dependendo do equipamento, Alvis Zhang, 2021.

A seguir na

Figura 38, é possível observar a comparação entre corte a plasma e jato d'água para uma peça metálica de elevada espessura.

Figura 38 - Corte à plasma e à frio



Fonte: Guerri (2022).

5.3.4 Viabilidade econômica

A depender de especificações do material a ser recortado. Materiais metálicos promovem um melhor custo-benefício para o corte a plasma em perfis e chapas de aço com espessura entre 10 mm e 25 mm. Já outras espessuras podem ser mais bem trabalhadas pelo corte com jato d'água. Cabe estudo individual de cada empresa, para analisar a velocidade do corte e assim verificar qual apresenta melhor custo-benefício.

Se for analisado o preço dos insumos para realização dos cortes, o preço da água torna o corte por jato, muito mais barato, uma vez que é possível reutilizar a água e os abrasivos presentes podem ser reciclados. Se as condições permitirem, o resíduo gerado pelo corte com

jato d'água pode ser utilizado para o processo de usinagem, pois não é deformado termicamente, Krajcarz (2014).

Alvis Zhang (2021) ressalta que apesar dos equipamentos de corte a plasma serem mais baratos, o custo de ambos é alto, portanto cabe análise do tipo de material a ser cortado antes de se projetar a fábrica e comprar os equipamentos.

5.4 Jato d'água x Laser

5.4.1 Características dos processos

O método de corte por jato d'água consiste, de forma simplificada na passagem de água sob pressão, com ou sem a presença de abrasivos, pelo material que deseja ser cortado.

O método de corte a laser consiste no processo de separação de matéria por meio de um raio laser guiado, moldado e concentrado explica, Trumpf (2020). No momento em que encosta na peça o material aquece de tal forma que derrete ou vira vapor em questão de instantes, toda a potência do laser é direcionada para um feixe com, geralmente, menos de meio milímetro de diâmetro.

A comparação entre esses dois métodos requer cuidado, pois ambos possuem especificidade de trabalho. As comparações a seguir tendem a ser feitas de forma mais equilibrada e com o mesmo viés, porém é necessário ter em consideração que cada método serve a um propósito específico que pode ser mais adequado para um projeto do que para outro, MGF Robots (2022).

Por meio de ensaios qualitativos, Adolpho e Lualdi (2008) chegaram aos seguintes dados dispostos no Quadro 5, a seguir:

Quadro 5 - Comparações feitas entre jato d'água e corte a plasma

Laser	Alta qualidade; Alta precisão; Alta reprodutibilidade.	Alta velocidade; Alto investimento; Médio-alto custo operacional.	1mm - 12mm
Jato de água	Alta qualidade; Alta precisão; Média-alta reprodutibilidade.	Baixa velocidade; Médio-alto investimento; Alto custo operacional.	1mm - 50mm

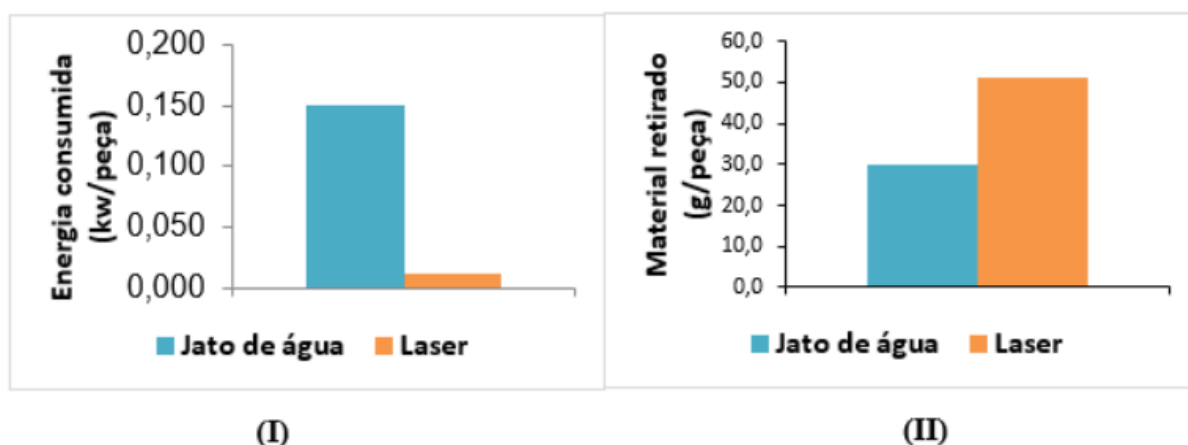
Fonte: Adaptado de Adolpho e Lualdi (2008).

5.4.2 Economia energética

Segundo a análise realizada por De Ataíde *et al.* (2020), o consumo de energia por peça cortada no método de corte a jato d'água é próximo de 0,15kW/peça, já o corte a laser é próximo de 0,0125kW/peça. Nota-se que o processo por jato d'água gasta mais energia por peça cortada, um dos fatores que implicam nisso é o fato de que esse processo gasta um tempo maior para realização dos cortes.

É possível observar nos gráficos da Figura 39 a seguir o consumo de energia por peça analisado por De Ataíde *et al.* (2020).

Figura 39 Comparação entre os processos de corte para os indicadores ambientais: (I) Consumo de energia; (II) Material retirado.



Fonte: De Ataíde *et al.* (2020).

Outro fator que cabe a análise para a economia energética, é a necessidade de descarte correto e reciclagem que está associado ao volume de material retirado de cada peça. Apesar de não ser possível quantificar o quanto é utilizado pelos sistemas da empresa para a separação e

descarte adequado dos resíduos, é notável que processos mais eficientes geram menos resíduos, e por consequência, menos energia gasta com reciclagem.

5.4.3 Qualidade

Ao falar de cortadores industriais, a qualidade da aresta de corte indica a esquadria da aresta acabada. Também fala de como o produto residual ou escória adere na parte inferior do corte.

Os estudos de Adolpho e Lualdi (2008) indicam que o método de corte a laser tem alta reprodutividade e um custo de operação menor que o outro método comparado, assim podendo ser considerado um processo mais otimizado.

Os cortadores de jato de água fornecem o corte da mais alta qualidade, o que deixa muito pouco ou nenhum resíduo para trás. Embora os cortadores de jato de água não exijam calor, isso pode causar problemas quando itens muito pequenos precisam ser cortados.

Os cortadores laser também proporcionam um corte quadrado preciso, mas podem abandonar alguma escória em materiais mais grossos como aço macio e aço inoxidável, MGF Robots (2022).

A precisão, especificamente a precisão da arte de corte, trata de como o tamanho da peça resultante se compara ao tamanho da peça que foi programado no cortador. Também leva em consideração a kerf. A distorção de calor também pode prejudicar o tamanho final, MGF Robots (2022).

Os cortadores de jato de água, oferecem a melhor precisão, geralmente dentro de 0,005" da peça pretendida com uma largura de corte de 0,035". Além disso, como mencionado anteriormente, os cortadores de jato de água não criam distorção de calor. Por outro lado, os cortadores a laser cortam dentro dos mesmos 0,005" e têm uma kerf média de 0,025". Infelizmente, os cortadores a laser podem criar alguma distorção de calor, principalmente em chapas mais grossas de acordo com (MGF Robots, 2022).

5.4.4 Viabilidade econômica

Os cortadores de jato de água exigem bombas de pressão ultra alta, o que pode levar o ponto de partida desses cortadores para R\$ 516.100,00, com até R\$ 181.000,00, dependendo dos recursos incluídos.

Os cortadores a laser, embora não ofereçam a versatilidade de um cortador de jato de água, são muito mais caros. A maioria dos cortadores a laser de alta qualidade começam em torno de R\$1.290.000,00, mas podem facilmente ultrapassar R\$ 5.161.000,00.

A extrema diferença de preço entre os cortadores a laser e os cortadores a jato de água é outra razão pela qual muitos fabricantes optam pela opção de jato de água de acordo com MGF Robots (2022)

Depois de assumir a despesa inicial real do cortador, os custos operacionais precisam ser levados em consideração. É preciso contabilizar energia e gás, bem como o custo de consumíveis e abrasivos. Além disso, essas máquinas exigirão manutenção para mantê-las em condições de operação seguras e eficazes.

Ao analisar os custos operacionais por hora, os cortadores a laser são estimados em aproximadamente R\$ 129,02 por hora. Os cortadores a jato de água, no entanto, são um pouco mais caros, custando aproximadamente R\$ 154,83 por hora segundo (MGF Robots, 2022).

5.5 Jato d'água x Oxicorte

5.5.1 Características dos processos

Os processos possuem metodologias bem diferentes, assim como suas limitações. Quando observamos a forma com que cada método realiza o recorte podemos perceber que o jato d'água aplica uma grande força sobre uma pequena área, ocasionando o cisalhamento por pressão, o que caracteriza este método como mecânico. Já o oxicorte se utiliza da reação química de oxidação para cisalhar metais ferrosos, após estes terem tido sua temperatura elevada.

Segundo Joaquim e Ramalho (2013) o método por jato d'água não apresenta limitações quanto ao material a ser recortado. A única exceção conforme explica Carvalho (2018) é o vidro temperado que se rompe. As maiores limitações deste processo ficam por conta de sua produtividade e custo-benefício, visto que trata de um processo oneroso desde a etapa de sua aquisição e moroso em sua execução.

O oxicorte também é um processo aplicado a inúmeros tipos de recortes segundo Condor (2014), porém este é amplamente difundido no mercado nacional, as tecnologias mais modernas permitem que este tipo de recorte seja computadorizado, fazendo com que o corte seja muito

mais preciso do que em versões manuais deste. Devido a sua facilidade operacional e baixos custos tanto com investimento inicial quanto operacional é comum ver este tipo de método em empresas de metalurgia que fornecem materiais para a construção civil.

É possível entender que estes métodos possuem particularidades bem distintas; Quando procuramos pelo processo mais completo entre os dois, podemos até chegar à conclusão de que o método por jato d'água é a opção ideal, porém para o mercado questões como facilidade operacional, produtividade e custo-benefício tendem a ser decisivas.

5.5.2 Economia Energética

O processo de oxicorte possui vantagem neste quesito, visto que não é preciso uma fonte de energia elétrica para a execução deste processo, mesmo que para a realização de qualquer processo industrial a energia elétrica seja necessária como: Luz, ar-condicionado, sistemas operacionais e entre outros, o processo de recorte por oxicorte não exige energia elétrica para seu funcionamento, salvo em situações em que é utilizado CNC para a realização do recorte. Em contrapartida o método por jato d'água necessita de energia para que o sistema seja operacionalizado, visto que se trata de um sistema automatizado, além de energia para alimentação da bomba.

5.5.3 Qualidade

O oxicorte não é capaz de proporcionar acabamento fino a peça e precisa passar por um processo de raspagem segundo AN Aços Nobres (2022) para sua finalização, principalmente para a retirada dos resíduos gerados pelo processo de recorte.

Devido a elevação da temperatura das peças metálicas quando cortadas, há a geração de uma zona termicamente afetada, que deve ser considerada no dimensionamento de peças e na necessidade de acabamento para evitar má qualidade nas extremidades da região cortada. Já o método de corte por jato d'água, não gera ZTA, o que implica numa melhor qualidade de acabamento para as extremidades das peças.

O jato d'água é capaz de manter uma excelente qualidade em termos de precisão e acabamento para peças finas (-6.4mm), médias (6.4mm – 32mm) e grossas (+32mm), chegando a cortar peças com até 450mm em casos extremos, segundo Dustre 2022).

Segundo a MGF Robots (2022), as máquinas de corte por jato d'água conseguem realizar cortes com um sulco de (0,889+-0,127) mm de espessura, conferindo um maior aproveitamento das peças e gerando menos resíduos.

5.5.4 Viabilidade econômica

Os cortadores de jato de água exigem bombas de pressão ultra alta, o que pode levar o ponto de partida desses cortadores para R\$ 524.658,97, com até R\$ 1.836.306,40, dependendo dos recursos incluídos. MGF Robots (2022), apresentando um custo de aproximadamente R\$ 154,83 por hora, MGF Robots (2022).

A seguir, na Tabela 6 é possível observar um estudo feito por Soares e Nascimento, 2016 mostrando o custo em dólar por peça executada por meio de equipamento de oxicorte.

Tabela 6 - Custo por peça em dólar

	Oxicorte
Custo do corte/hora em (US\$)	
Consumíveis	0,06
Alimentação	0,00
Gás	6,20
Custo operacional/hora	6,26
Nº de peças produzidas/hora	25
US\$/peça (Custo por hora dividido pelo número de peças)	0,25

Fonte: Adaptado de Soares e Nascimento (2016);

5.6 Laser x Oxicorte

5.6.1 Características dos processos

Os dois métodos colocados a frente são processos complementares, visto que a faixa de atuação ou de maior efetividade de cada um é distinta, além da possibilidade de atuação em diferentes materiais por parte do método a laser.

Segundo Urtado, Lima e Baino (2013) o oxicorte deve ser aplicado em chapas grossas acima de 25mm principalmente devido ao baixo custo de aquisição e operacional. Como a velocidade dos demais processos nesta espessura é relativamente baixa, estimam-se resultados superiores de produtividade em relação a tempo e custos.

Estudos por Urtado, Lima e Baino (2013) contrapõe sobre o método a laser que deve ser aplicado em chapas finas, abaixo de 6,4mm, principalmente devido à alta velocidade de corte em relação aos demais processos. A produtividade em relação ao investimento pode ser objeto de discussão conforme apresentado na Figura 41. Contudo, devido ao elevado ganho de velocidade, o resultado de produtividade em relação ao recurso tempo é consideravelmente maior.

5.6.2 Economia Energética

O processo de oxicorte possui vantagem neste quesito, visto que não é preciso uma fonte de energia elétrica para a execução deste processo, mesmo que para a realização de qualquer processo industrial a energia elétrica seja necessária como: Luz, ar-condicionado, sistemas operacionais e entre outros, o processo de recorte por oxicorte não exige energia elétrica para seu funcionamento, salvo em situações em que é utilizado CNC para a realização do recorte. Em contrapartida o método por laser necessita de energia elétrica para que o sistema seja operacionalizado, visto que se trata de um sistema automatizado, além de eletricidade para que seja possível realizar estimulações eletrônicas ou transmissões moleculares para níveis mais baixos de energia, gerando o feixe de luz

5.6.3 Qualidade

Podemos destacar que o Laser possui uma das melhores precisões para chapas finas dentre todos os processos, sendo assim para chapas metálicas até 6.4mm que exijam alta precisão de corte o método escolhido deve ser o laser. Porém na construção civil muitas vezes nos deparamos com chapas que possuem espessuras maiores e que não precisam de um nível de acabamento milimétrico, por isto o oxicorte é recomendado nestes casos, algumas destas observações podem ser verificadas na comparação abaixo.

Quadro 6 - Oxicorte x Laser

Característica	Oxicorte	Laser
Qualidade	Boa angularidade; Grande zona térmica afetada; Níveis de escória exigem retrabalho; Não funciona bem em aço inoxidável ou alumínio.	Excelente angularidade; Pequena zona térmica afetada; Praticamente não forma escória; Corte com detalhamento fino com sangria mais estreita, de bom a excelente.

Fonte: Adaptado de Urtado, Lima e Bairo (2013).

Algumas das comparações acima podem ser metrificadas na análise feita por Grenha (2015).

Tabela 7 Comparação entre Oxicorte x Laser

	Laser	Oxicorte
Largura da fenda (mm)	0,1-10	>2
Áreas afetada pela temperatura (mm)	0,05	>0,6
Qualidade relativa da aresta (Relativo)	Reta,Suave	Reta,rugosa

Fonte: Adaptado de Grenha (2015).

Segundo Grenha (2015) são dois os fatores essenciais ao se analisar a qualidade de cortes térmicos, estes são a kerf e a ZTA. A zona afetada pelo calor é importante quando se pretende manter as mesmas características mecânicas ao longo de toda a extensão da peça, muitas vezes os furos não podem ser feitos com recurso térmicos ou devem afetar a peça de maneira mínima, visto que o aquecimento dessa zona provoca a têmpera do material tornando a superfície mais frágil e impedindo operações como a roscagem, necessária a processos de montagem de estruturas metálicas.

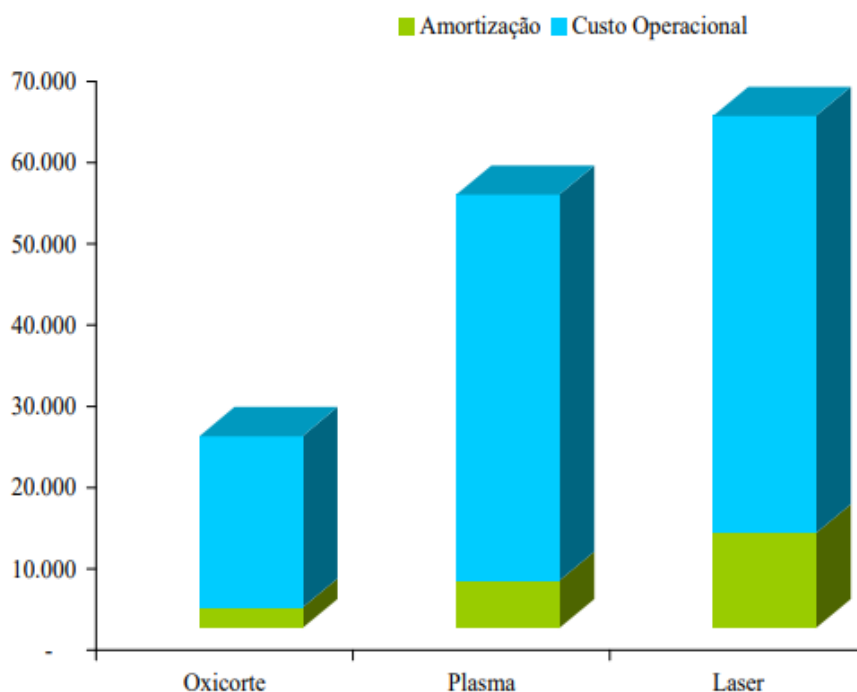
Já a kerf é relevante em casos mais complexos de recorte, que na maior parte dos casos não se enquadra nos moldes utilizados em peças para a construção civil, este parâmetro também está associado geralmente ao acabamento do recorte, embora não seja determinante para isto, visto que as especificações do material em especial a sua espessura, serão determinantes para o acabamento final do recorte a laser.

5.6.4 Viabilidade econômica

Para esta análise levamos em consideração o comparativo realizado por Urtado, Lima e Bains (2013), que além dos métodos laser e oxicorte também leva em consideração o processo por plasma, porém a discussão neste tópico será voltada apenas aos dois processos de destaque no item 4.6. deste trabalho.

Neste estudo é relatado que o investimento em uma máquina deve ser amortizado em 10 anos, ou 120 meses, isto nos proporciona o primeiro parâmetro que diz respeito aos custos mensais de cada equipamento, como podemos ver na Figura 40. Foram restringidos os valores relativos de aquisição das máquinas e custos de operação dos processos, os custos mensais relativos são representados em reais no gráfico abaixo.

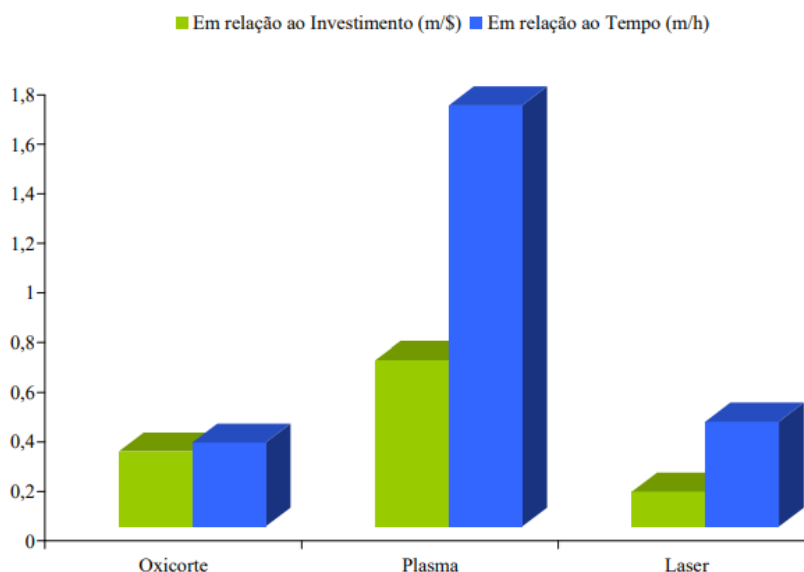
Figura 40 - Custo mensal



Fonte: Urtado, Lima e Bains (2013).

É importante ressaltar que estes valores são referentes a cerca de uma década atrás ou seja as tecnologias mais modernas podem alterar significativamente estes resultados, embora a análise do trabalho até aqui tenha apontado na direção destes macro indicativos em relação a valores.

Figura 41 - Produtividade Mensal



Fonte: Urtado, Lima e Baino (2013).

A Figura 41 compara a produtividade dos processos para recortes em uma chapa de 12,7mm de espessura, ou seja os resultados obtidos são pouco representativos tanto para o método de oxicorte quanto para o laser, visto que a principal faixa de atuação segundo Urtado, LIMA e Baino (2013) é a partir de 25mm e de abaixo de 6.4mm respectivamente, porém é possível trabalhar com ambos os métodos com matérias que possuem essa especificação, desde que sejam ferrosos e não possuam específicos comprimentos de onda que gerem refletividade.

Concluimos que em uma faixa intermediária de atuação o oxicorte possui vantagens em relação ao seu investimento que contempla tanto o custo de aquisição quanto o custo operacional do processo, ou seja se contabilizarmos a quantidade de metros escoadas e dividirmos pelo valor do investimento temos um parâmetro duas vezes maior para o processo de oxicorte. Já para a relação de tempo o processo a laser leva vantagem, visto que a quantidades de metros produzidas em 1 hora de trabalho é um pouco maior.

6 RESULTADO

Por meio de pesquisas teóricas em literatura e por meio de um questionário enviado as empresas, foi possível obter informações sobre os processos de recorte e furação que levaram a realização de uma tabela para sintetizar os dados. A forma com que esta tabela foi elaborada e avaliada é descrita no item 3.2.

Tabela 8 Resultado final (continua)

Notas de 0-10	Oxicorte (Manual)	Pontuação para 6mm	Pontuação para 12mm	Plasma (CNC)	Pontuação para 6mm	Pontuação para 12mm
Velocidade de corte	Lento	5	4	Alta velocidade	9	8
Acabamento	Geralmente exige a necessidade de acabamento final	5	4	Necessita de pouco ou nenhum acabamento final	8	8
Custo horário	Cerca de R\$25/hora	9	9	Cerca de R\$112/hora	7	6
Qualidade do corte	Gera ZTA, cortes não mecanizados tendem a gerar rebarbas e imprecisões	5	6	Gera pouca ZTA, rebarbas ou imprecisões, realiza cortes limpos e precisos	7	7
Geração de resíduos	Maior geração de resíduos como escória	4	4	Baixa geração de gases, resíduos e ruídos.	8	8
Consumo energético	Não consome energia elétrica	10	10	Em média 0,11 kW/Peça	8	7
Investimento inicial	Baixo custo	9	9	Equipamentos entre R\$ 70.000 e R\$ 1.000.000,00	6	6
variedade de cortes	Aço inoxidável, níquel, alumínio, cobre e suas ligas, não podem ser cortados por este processo, possui boa adaptabilidade de formas.	5	5	Não pode ser utilizado em metais não eletro condutores; Alta adaptabilidade de formas	9	9
Espessura de corte	Possui boa faixa de atuação 3mm - 2800mm, tendo sua zona ótima de trabalho próximo de 50mm	10	10	Ideal para peças de 1 mm até 80mm, com zona ótima de trabalho próxima a 25mm	8	8
Total	-	62	61	-	70	67

Fonte: Autores (2023).

Tabela 8 Resultado final (conclusão)

Notas de 0-10	Laser (CNC) Co2	Pontuação para 6mm	Pontuação para 12mm	Jato d'água (CNC)	Pontuação para 6mm	Pontuação para 12mm
Velocidade de corte	Alta	7	6	Lento	4	3
Acabamento	Necessita de pouco ou nenhum acabamento final	10	9	Sem necessidade para a maioria das espessuras e materiais	9	9
Custo horário	Custo varia consideravelmente de acordo com a espessura do material	6	5	Cerca de R\$154/hora	6	4
Qualidade do corte	Gera pouca ZTA, rebarbas ou imprecisões, realiza cortes limpos e precisos	8	6	Sem ZTA, poucas rebarbas ou imprecisões, realiza cortes limpos e precisos	9	9
Geração de resíduos	Baixa geração de gases, resíduos e ruídos.	8	8	Resíduo metálico não contaminado ou afetado termicamente; Água + abrasivo podem ser reutilizados no sistema. Porém há poluição sonora.	9	9
Consumo energético	Em média 0,01kW/peça	9	8	Em média 0,15 kW/peça	7	6
Investimento inicial	A maioria dos cortadores a laser de alta qualidade custam entre R\$1.290.000,00 - R\$5.161.000,00.	3	3	Equipamentos entre R\$ 524.658,97 R\$ 1.836.306,40	5	5
variedade de cortes	Programavel para o formato necessário de projeto, pode cortar diversos tipos de materiais, adaptabilidade para formatos em 3d.	10	10	Programavel para o formato necessário de projeto; Pode cortar diversos tipos de materiais	9	9
Espessura de corte	Principais limites de corte entre 0,10mm e 20 mm	7	7	0,8 - 100mm podendo aumentar a espessura dependendo do equipamento e dureza do material	9	9
Total	-	68	62	-	67	63

Fonte: Autores (2023).

7 CONCLUSÃO

Entre os processos de corte e furação de perfis apresentados os mais utilizados pelas empresas de metalurgia e que possuem maior aceitação do mercado são os métodos a plasma, laser, oxicorte e jato d'água que em determinado momento do trabalho são comparados entre si, a aceitação destes métodos provém principalmente de sua qualidade executiva, eficiência energética, produtividade e/ou custo-benefício.

Levando em consideração o retorno de uma das empresas que atende exclusivamente o mercado de construção civil, a quantidade de resíduos metálicos produzidos ao mês é de cerca de 100 toneladas, podemos observar a importância para o meio ambiente o aprimoramento dos métodos de recorte, assim como a escolha correta desses métodos para cada situação.

De acordo com as comparações realizadas podemos observar que os métodos em muitos casos se complementam embora o corte a plasma seja um dos mais difundidos principalmente fora do mercado nacional, pela sua alta produtividade, qualidade e custo-benefício.

Numa ampla faixa de espessura entre 6,4 e 25mm o Plasma representa maior produtividade e custo-benefício que os processos Oxicorte, Laser e jato d'água em relação aos dois recursos escassos mais importantes na indústria, o recurso financeiro e o tempo.

Com os avanços tecnológicos do maquinário, equipamentos e acessórios, a qualidade entre os processos Oxicorte, Plasma e Laser são bastante similares em espessuras médias e peças de contornos simples ou de média complexidade, promovendo uma pequena vantagem ao corte por jato d'água, que pode promover cortes mais limpos e sem ZTA.

O oxicorte tem boa aceitação principalmente no mercado nacional visto que possui baixo investimento inicial e operacional, além de realizar cortes precisos e ser eficiente em metais ferrosos de alta espessura.

O corte a laser é uma excelente complementação do corte a plasma, visto que é mais eficiente em relação a velocidade, qualidade de recorte e consumo de energia para metais com baixa espessura, além de realizar formas mais precisas em peças 3d e ampliar a gama de materiais recortados como acrílicos, madeira e metais não condutores.

Por fim o processo por jato d'água, este é o de menor aplicação entre os já apresentados, principalmente por se tratar de um processo oneroso e moroso, porém é a complementação ideal

para peças espessas e que não podem ser recortadas pelos demais processos ou que mesmo se recortadas não mantem o acabamento. No viés ambiental, é o que causa menor impacto ambiental, uma vez que o resíduo metálico não é afetado por calor ou outra substância, pode ser reciclado e a solução (água + abrasivo) pode ser reutilizada no sistema novamente após limpeza.

Por meio do estudo realizado nessa pesquisa, foi compreendido que a necessidade de diversificar o maquinário industrial dentro de uma empresa pode servir para compensar necessidades específicas de cada indústria. Caso uma empresa deseje focar apenas em um sistema de corte, é possível que gere maiores impactos, seja no setor financeiro, com altos custos iniciais de investimentos ou grande geração de resíduos, para compensar a velocidade de corte.

Logo, se uma empresa busca alternativas sustentáveis e que melhorem sua linha produtiva, por motivos como a busca de investidores que aportam em tecnologias “verdes” ou clientes que priorizem estas ações, é possível escolher o método mais adequado, a partir do entendimento da cadeia produtiva, dos resultados esperados e como alcançar estes objetivos da melhor maneira possível.

O estudo junto ao cliente final, entendendo suas necessidades, é um fator fundamental para embasar a decisão do método a ser utilizado pelas empresas.

Outra conclusão obtida por esse estudo é que o ciclo de vida de uma estrutura metálica é complexo e mais abrangente do que se imagina a busca por sistemas construtivos limpos e que agredem menos ao meio ambiente deve envolver uma análise desde a extração da matéria prima, até a conclusão da obra.

As maiores limitações prenderam-se com o difícil acesso à informação que sustenta o modelo de orçamentação, necessário para análises econômicas e comparações energéticas.

Quanto a trabalhos futuros, seria vantajoso o estudo de caso ou pesquisa com enfoque em viabilidade econômica com parâmetros atuais e envolvendo diferentes tipos de equipamentos para um mesmo processo.

8 APÊNDICE A – Questionário de Mercado

Para entender melhor quais são os métodos de corte mais utilizados pelas empresas brasileiras e o porquê usam esses métodos, foram elaborados 3 questionários e enviados a cerca de 20 empresas do país e 1 empresa multinacional, que trabalham com a construção de estruturas metálicas para a construção civil, fabricação e corte de estruturas e perfis metálicos e que vendem os equipamentos de cortes. As empresas que nos retornaram pediram, por questões de “*compliance*”, para não serem divulgadas.

A seguir serão mostradas as perguntas e respostas obtidas das empresas que se disponibilizaram a responder:

Empresa (1)

1. Qual(is) sistema(s) usam para corte de chapas, perfis metálicos, vigas ou telhas metálicas atualmente?

Para as Chapas, utilizamos o Corte com Plasma e Oxicorte. Ambos com CNC. Utilizamos também o Corte a frio com Guilhotina, além de executarmos furações com brocas e punções.

Para os Perfis Metálicos, são utilizados processos a plasma, oxicorte, serra e furação com broca.

2. Já usou outro equipamento de corte? Se sim, qual era e porque mudou?

Não.

3. O(s) equipamento(s) que utilizam geram algum tipo de resíduo?

Sim. Durante o Processo de Corte são gerados retalhos de material (sucata), borra/escória (material fundido e oxidado), pó e gases.

4. O(s) equipamento(s) que utilizam, tem alguma restrição de uso? (P.e. oxicorte não pode ser usado para vigas metálicas, limite de espessura de chapas/perfis, tipo de material que pode ser cortado etc.)

a. Se sim, seria possível explicar quais limitações? Onde poderíamos encontrar tais dados?

Sim. Cada equipamento possui suas limitações de uso, de acordo com a especificação do fabricante. Caso tenham interesse, podem encontrar dados com a capacidade geral da empresa no site.

5. É necessário algum tipo de tratamento ou acabamento da região que é cortada nas chapas, vigas ou perfis metálicos?

Sim. Normalmente, as peças recebem acabamento por esmerilhamento.

6. Sua empresa já realizou alguma análise de ciclo de vida sobre impactos causados pelo(s) equipamento(s) que utilizam? Se sim, quais foram os critérios utilizados e os dados obtidos?

Informação não disponível.

7. Quais dados técnicos do equipamento poderíamos obter de vocês para análise do equipamento/método de corte a plasma?

Consultar informações preliminares no site.

8. Caso tenha utilizado outro tipo de equipamento para corte, houve algum tipo de economia com a mudança de equipamento?

Empresa já foi projetada com os processos já descritos.

9. Há algum dos equipamentos utilizados que seja mais recomendado para o uso em estruturas metálicas?

Todos são recomendados.

10. Vocês possuem alguma análise de payback para o(s) equipamento(s) implementados atualmente. Sem que nós invadamos a privacidade de dados da empresa, mas questões como viabilidade e possibilidade e tempo de retorno seriam muito importantes para nossa análise.

Informação não disponível.

11- Gostaríamos de saber como a empresa quantifica os cortes que realizam? (p.e. por metro, por perfil ou outra unidade? **O Controle é feito por peso (toneladas)**

12- O que, a empresa que trabalha, faz com esses resíduos? (p.e. tem algum contrato de parceria com alguma empresa de reciclagem ou apenas descartam como lixo industrial) **A sucata é revendida para usina, para ser fundida novamente.**

13- Vocês têm algum registro de quantidade desses resíduos produzidos (p.e. 1 ton./mês)? Se sim, poderiam nos informar uma média desses valor? **Cerca de 100 tons/mês**

Empresa (2)

Industria metalúrgica de grande porte instalada no estado do Rio Grande do Sul.

1. Qual(is) sistema(s) usam para corte de chapas ou perfis metálicos atualmente?

Chapas: De (3 a 44) mm de espessura, utilizamos equipamentos de corte a plasma. De (50 a 120) mm de espessura, utilizamos Oxicorte. Obs. Todos os processos são automatizados e utilizam Controle Numérico computadorizado (CNC).

Perfis Laminados: Temos equipamentos CNC dedicados a corte e furação automatizada de perfis laminados, o método é corte é por serra fita e a furação por broca.

Recorte de Perfis Laminados: Adquirimos recentemente um equipamento que realiza o recorte dos perfis laminados e tubos, pelo processo de corte a plasma.

2. Qual critério utilizam para escolher tal(is) equipamento(s) para corte?

Tolerâncias dimensionais e acabamento solicitado além de levarmos em conta o processo posterior e a capacidade dos equipamentos.

3. O(s) equipamento(s) de corte que utilizam gera algum tipo de resíduo?

É comum do Processo de corte a plasma gerar 3 tipos de resíduos:

- A borra (Aço derretido durante o processo de corte);
- O Pó (a fumaça que é gerada durante o corte é aspirada e filtrada, as pequenas partículas retidas pelo filtro do equipamento são agrupadas formando uma pequena quantidade de pó).
- Sucata (restos de matéria prima que não foram transformadas em peças).
- Furação com broca gera o “cavaco”, materiais removidos durante o processo de usinagem;
- Corte com serra, gera o “cavaco”, materiais removidos durante o processo de corte.
- oxicorte, gera a borra (Aço derretido durante o processo de corte) e sucata;

4. O(s) equipamento(s) que utilizam, tem alguma restrição de uso? (P.e. limite de espessura de chapas/perfis, tipo de material que pode ser cortado etc.) Se sim, quais limitações?

Utilizar os limites citados na pergunta 01. Geralmente são relacionados a capacidade do equipamento. Sugiro uma literatura sobre o processo de corte a plasma. E sobre quais os maiores perfis laminados disponíveis nacionalmente, trabalhamos dentro dos limites máximos.

5. O(s) equipamento(s) de corte que utilizam requer algum tipo de tratamento ou acabamento da região que é cortada nas chapas ou perfis metálicos?

Sim, esmerilhamento, jateamento, usinagem, depende do Critério de pintura.

6. Já usou outro equipamento de corte? Se sim, qual era e porque mudou?

Durante a trajetória da empresa foram utilizados vários métodos, quando há uma substituição buscassem, maior capacidade de produção, atualização do parque fabril, mecanização de processos, emprego de novas tecnologias, redução de custos, melhoria na competitividade entre outros.

7. Houve algum tipo de economia com a mudança de equipamento?

- Redução de custo em consumíveis, mão de obra, diminuição de índice de sucata, redução de lead time etc..

8. Sua empresa já realizou alguma análise de ciclo de vida sobre impactos causados pela produção de perfis e chapas metálicas com os equipamentos atuais ou antigo para compará-los? Se sim, quais foram os critérios utilizados e os dados obtidos?

- Sim, tempo de corte, custo por peça, lead time. Dados são de caráter estratégicos.

9. Vocês possuem alguma análise de payback para o(s) equipamento(s) implementados atualmente. Sem que nós invadamos a privacidade de dados da empresa, mas questões como viabilidade e possibilidade e tempo de retorno seriam muito importantes para nossa análise.

Sempre são analisados, é a premissa para um novo investimento.

10. Existe algo fora destas 9 perguntas que entenda ser interessante para nossa pesquisa?

Não.

1- Gostaríamos de saber como a empresa quantifica os cortes que realizam? (p.e. por metro, por perfil ou outra unidade?)

Por unidade no controle do processo e vende por tonelada produzida.

2- O que a empresa que trabalha faz com esses resíduos dos cortes? (p.e. tem algum contrato de parceria com alguma empresa de reciclagem ou apenas descartam como lixo industrial)

As borras são vendidas como sucata de metal, tem um valor inferior se utilizarmos como referência a sucata de chapa.

3- Vocês têm algum registro de quantidade desses resíduos produzidos (p.e. 1 ton/mês)? Se sim, poderiam nos informar uma média desses valores?

Este é um dado que varia muito de acordo com a produção, mas como finalidade de estudo você pode utilizar 1% do peso produzido, somente considerando borra de corte e cavacos.

REFERÊNCIAS

- ADOLPHO, D.; LUALDI, B. **Comparativo entre a produtividade e custo operacional dos processos de corte plasma convencionais e a tecnologia de corte plasma utilizando água como gás secundário**. Rio de Janeiro: Infosolda o portal brasileiro da soldagem, 2008. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/corte/comparativo-entre-a-produutividade-e-custo-operacional-dos-processos-.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2022.
- ALMACAM. **Corte de metal ao jato de água**. [Porto Alegre]: Almacam, [2018]. Disponível em: <https://pt-br.almacam.com/tecnologias/trabalho-da-chapa/trabalho-da-chapa-corte-com-jato-dagua/>. Acesso em: 06 ago. 2022.
- ALMACAM. **Puncionamento**. [Porto Alegre]: Almacam, [2019.] Disponível em: [https://pt-br.almacam.com/tecnologias/trabalho-da-chapa/puncionamento/#:~:text=O%20puncionamento%20%C3%A9%20um%20processo,furo%20\(corte%20por%20puncionamento\)](https://pt-br.almacam.com/tecnologias/trabalho-da-chapa/puncionamento/#:~:text=O%20puncionamento%20%C3%A9%20um%20processo,furo%20(corte%20por%20puncionamento)). Acesso em: 23 out. 2022.
- ALMEIDA, A. N. **Máquina CNC para corte laser de perfis metálicos: sistemas de atuação dos eixos do módulo de corte laser**. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/107692/2/218244.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- ALMEIDA, P. V. S.; AUAD, F. D. K. A importância da estrutura metálica na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 11, p. 23862-23869, 2019. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/4424/4146>. Acesso em: 28 jul. 2022.
- AN AÇOS NOBRES. **Oxicorte**: Tudo o que você precisa saber. [Sorocaba]: Aços Nobre, [2022]. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/oxicorte-cnc-o-que-e-empresa-em-sp/>. Acesso em: 17 dez. 2022.
- ANTUNES, F.; SCHAEFFER, L.; CASTELAN, J. **Corte e conformações de metais**. [São Paulo]: Corte e Conformação, 2016. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/ccm/materia/2016/12/21/uma_analise_dos_parametros.html. Acesso em: 23 jul. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Cenário dos fabricantes**. [São Paulo]: ABCM, 2021. Disponível em: <https://www.abcem.org.br/site/estatisticas-cenarios-dos-fabricantes>. Acesso em: 19 dez. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229** - projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de janeiro. ABNT, 1993.
- ATAIDE, M.; SOUSA, J.; NASCIMENTO, C.; SALES, W. Análise da sustentabilidade dos processos de corte por laser e corte por jato d'água aplicados na indústria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 11., 2020, Vitória. **Anais** [...]. Vitória: Ibeas, 2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2020/II-005.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

BLUMENSCHIEIN, R. N. Introduzindo sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção. **Revista Mosaico**, Brasília, v. 2, n. 1, p.17-25, 2009. Disponível em: <https://seer.pucgoias.edu.br/index.php/mosaico/article/view/779/596>. Acesso em: 05 set. 2022

CARVALHO, S. **Quais os tipos de corte mais adequados para peças metálicas?** [Brasil]: AECweb, 2018. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/quais-os-tipos-de-corte-mais-adequados-para-pecas-metalicas/17468>. Acesso em: 22 out. 2022.

CASA DO SERRALHEIRO. **Corte a plasma**: saiba tudo sobre esse processo. [Cariacica] Casa do Serralheiro, [2022]. Disponível em: <https://casaserralheiro.com.br/corte-a-plasma-saiba-tudo-sobre-esse-processo/#:~:text=O%20corte%20a%20plasma%20funciona%20utilizando%20um%20arco, trabalho%2C%20o%20in%C3%ADcio%20do%20corte%20%C3%A9%20praticamente%20instant%C3%A2neo>. Acesso em: 30 jun. 2022.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE EDIFICAÇÕES. **Sustentabilidade na Construção Civil**: conceitos e tendências. [São Paulo]: CTE, 2020. Disponível em: <https://cte.com.br/blog/sustentabilidade/sustentabilidade-na-construcao-civil-conceitos-e-tendencias/>. Acesso em: 22 jul. 2022.

CÉSAR, P. **Principais características do Oxicorte**. [Aparecida de Goiânia]: Alusolda, 2017. Disponível em: <https://alusolda.com.br/principais-caracteristicas-do-oxicorte/>. Acesso em: 23 jul. 2022.

CONDOR. **O que é oxicorte** : entenda de uma vez as características deste processo. [Contagem]: Condornet, [2014]. Disponível em: <https://www.condornet.com.br/condor/pt/education/blog/oxicorte-sepracao-de-metais.cfm#:~:text=O%20oxicorte%20%C3%A9%20o%20processo,atingir%20seu%20ponto%20de%20igni%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 17 dez. 2022.

CÔRTEZ, R.; FRANÇA, S.; QUELHAS, O.; MOREIRA, M.; MEIRINO, M. Contribuições para a sustentabilidade na construção civil. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v. 6, n. 3, p. 384-397, 2011. Disponível em: https://web.archive.org/web/20160530060207id_/http://www.revistasg.uff.br:80/index.php/sg/article/viewFile/V6N3A10/V6N3A10. Acesso em: 22 jul. 2022.

DBC OXIGÊNIO. **Vantagens e limitações do processo de Corte de Metais por Plasma**. [Boituva]: DBC Oxigênio, [2014]. Disponível em: <http://guias.oxigenio.com/vantagens-e-limitacoes-processo-de-corte-de-metais-por-plasma>. Acesso em: 05 dez. 2022.

DISERRAÇO. **Serra fita para aço**. [Limeira]: Diserraco, [2020]. Disponível em: <https://www.diserraco.com.br/serra-fita-aco>. Acesso em: 14 ago. 2022.

DUSTRE. **Corte com jato de água com pressão** : Dustre industrial. [Osasco]: Dustre, [2022]. Disponível em: <https://dustre.com.br/servicos/corte/corte-com-jato-de-agua/#:~:text=O%20corte%20com%20jato%20de%20%C3%A1gua%2C%20tamb%C3%A9m%20conhecido,meio%20de%20fortes%20cortes%20por%20press%C3%A3o%20de%20%C3%A1gua%29>. Acesso em: 11 out. 2022.

ECORESPONSE. **Qual o destino dos resíduos de construção civil?** [Campo Bom]: Ecoresponse, 2020. Disponível em: <https://www.ecoresponse.com.br/blog/noticia-interna/residuos-construcao-civil-170#:~:text=No%20Brasil%20apenas%2020%25%20dos,da%20Constru%C3%A7%C3%A3o%20Civil%20e%20Demoli%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 26 nov. 2022.

FALEIROS, J. P. ; JUNIOR, R. T.; SANTANA. O crescimento da indústria brasileira de estruturas metálicas e o boom da construção civil: um panorama do período 2001-2010. **BNDES**. Rio de Janeiro, v. -, n. 35, p. 47-84, 2012. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1517/1/A%20set.35_O%20crescimento%20da%20ind%20c3%bastrua%20brasileira%20de%20estruturas_P.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.

FICAÇÃO COMÉRCIO E INDÚSTRIA DE AÇO E FERRO LTDA. **Conheça as diferenças entre o corte a plasma e o corte a laser.** [São Paulo]: Ficaço, [2015]. Disponível em: <https://www.ficaco.com.br/single-post/2015/05/15/conhe%C3%A7a-as-diferen%C3%A7as-entre-o-corte-a-plasma-e-o-corte-a-laser>. Acesso em: 14 ago. 2022.

GARIBOLDI; PREVITALI. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure. **Journal of Materials Processing Technology**, Milan v. 160, n. 1, p. 77-89, 2004. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013604007411>. Acess: 25 Nov. 2022.

GRENHA, C. A. G. **Corte térmico** : orçamentação de produtos e racionalização do processo. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2015. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40140/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Carlos%20Grenha_2015.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.

GRUPOBAW. **Laser versus plasma.** [Caxias do Sul]: Grupobaw, 2020. Disponível em: <https://www.baw.com.br/blog/postagem/laser-x-plasma>. Acesso em: 29 out. 2022.

GUERCI, L. **Comparação completa entre corte à plasma x jato de água.** [Belo Horizonte]: Erotecnica, [2022]. Disponível em: <https://erotecnica.com.br/2022/03/20/comparacao-entre-corte-plasma-e-corte-jato-de-agua.html>. Acesso em: 11 out. 2022.

HYPERTHERM. **Custos operacionais do corte a plasma automatizado.** [Guarulhos]: Hypertherm, 2016. Disponível em: <https://www.hypertherm.com/pt/resources/articles/operational-costs-of-automated-plasma-cutting/>. Acesso em: 09 jan. 2023.

ILII, S. M.; COTEATA, M. Plasma arc cutting cost. **International Journal of Material Forming**, Romania, v. 2, n. 1, p. 689-692, 2008. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12289-009-0588-4>. Acess: 8 Dec. 2022.

ILII, S. M.; COTEATA, M.; MUNTEANU, A. Experimental results concerning the variation of surface roughness parameter (Ra) at plasma arc cutting of a stainless steel workpiece. **International Journal of Modern Manufacturing**, Romania, v. 2, n. 1, p. 31-36, 2010. Available from: https://ijmmt.ro/vol2no12010/Sanda_Maria_Ilii.pdf. Acess: 20 Dec. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de sustentabilidade**. Rio de Janeiro: IAB, 2020. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

JOAQUIM, R.; RAMALHO, J. **Jato de água**. [Osasco]: Infosolda o portal brasileiro da soldagem, [2013]. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/corte/jato-de-aqua.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2023.

JORNAL DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Aço Brasil confirma forte crescimento do consumo de aço em 2021**. [Brasil]: Jornal da construção civil, 2021. Disponível em: <https://www.jornaldaconstrucaocivil.com.br/aco-brasil-confirma-forte-crescimento-do-consumo-de-aco-em-2021/>. Acesso em: 29 out. 2022.

KARPINSKI, L. A. **Proposta de gestão de resíduos da construção civil para o município de Passo Fundo - RS**. 2007. Monografia (Especialização em Infra-estrutura e meio ambiente) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2007. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/262#preview-link0>. Acesso em: 16 dez. 2022.

KASHIWAGI, F. N. **Estudos em corte por plasma usando delineamento de experimentos**. 2016. Monografia (Especialização em Qualidade e Produtos) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/478?locale-attribute=es>. Acesso em: 15 dez. 2022.

KONDRASOVAS, D. **Processo de corte de chapa**. [Brasil]: Blog do david, 2010. Disponível em: <https://davidkond.wordpress.com/2010/08/10/processo-de-corte-de-chapa/>. Acesso em: 06 ago. 2022.

KRAJCARZ, D. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. **International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation**. Kielce, v. 69, n. -, p. 838 - 843, 2014. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003075>. Acess: 11 Dec. 2022.

LAMIM-GUEDES, V. Crise ambiental, sustentabilidade e questões socioambientais. **Ensaio**. Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 1 - 9, 2013. Disponível em: <http://www.cienciaemtela.nutes.ufrj.br/artigos/0602es01.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.

LAYER, J. K.; KAERWOWSKI, W.; FURR, A. The effect of cognitive demands and perceived quality of work life on human. **International Journal of Industrial Ergonomics**. USA, v. 39, n. 2, p. 413 - 421, 2009. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016981410800173X>. Acess: 26 Nov. 2022.

LEITE, I. C. D. A.; DAMASCENO, J. L. C.; REIS, A. M.; ALVIM, M. Gestão de resíduos na construção civil: um estudo em belo horizonte e região metropolitana. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 159-175, 2018. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/44439/pdf>. Acesso em: 14 out. 2022.

LERIPIO, D. A.; LERIPIO, D. C. Cadeias produtivas sustentáveis. **Mix sustentável**. Itajaí, v. 1, n. 1, p. 142-159, 2015. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1137/516>. Acesso em: 22 jul. 2022.

LIUBARTAS, D.; SILVA, B, S, A, E.; SANTOS, M, A, E.; SILVA, J. E.; FORMIGONI, A. A sustentabilidade em estruturas metálicas. **INOVAE -Journal of Engineering and Technology Innovation**. São Paulo, v. 3, n. 1. p. 92- 110, 2015. Disponível em: <http://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/382/809>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MACKRIDGE, L. Cutting the cost of cutting. **TWI world center for materials joining technology**, England, v. 36, n. 2, p. 4, 1995.

MEGAPLASMA. **Megaplasma tecnologia em corte a plasma**. [Boituva]: Megaplasma, [2017]. Disponível em: <https://megaplasma.com.br/blog/como-funciona-o-corte-plasma/#:~:text=O%20corte%20a%20plasma%20%C3%A9,e%20outros%20metais%20elettricamente%20condutores>. Acesso em: 30 jul. 2022.

MESSER. **Messer cutting systems**. [Jundiaí]: Messer, [2022]. Disponível em: <https://br.messer-cutting.com/empresa/news/detail/por-que-o-sistema-de-corte-termico-oxicorte-e-considerado-o-mais-economico#:~:text=Todos%20os%20materiais%20ferrosos%20podem,lat%C3%A3o%2C%20alum%C3%ADnio%20ou%20a%C3%A7o%20inoxid%C3%A1vel.&text=Uma%20das%20>. Acesso em: 20 jan. 2023.

MGF ROBOTS. **Corte com jato de água vs. corte a laser**. [Brasil]: Mfgrobots, [2022]. Disponível em: <http://pt.mfgrobots.com/mfg/it/1004042230.html>. Acesso em: 22 out. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Manual para implantação de sistema de gestão de resíduos de construção civil em consórcios públicos**. Brasília: Secretaria de recursos hídricos e ambiente urbano, 2010. Disponível em: http://www.resol.com.br/textos/publicacao_manual_implantao_sistema_gesto_resduos_construo_civil_cp_125.pdf. Acesso em: 15 ago. 2022.

NAKAGAWA, M. **90% dos resíduos industriais gerados por metalúrgica no Brasil é reciclado**. [Brasil]: Dias mais sustentáveis, 2021. Disponível em: <https://diasmaissustentaveis.com/90-dos-residuos-industriais-gerados-por-metalurgica-no-brasil-e-reciclado/>. Acesso em: 18 dez. 2022.

NARDIN, F. Â. **A Importância da Estrutura Metálica na Construção Civil**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade são francisco (USF), Itatiba, 2008. Disponível em: <https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1268.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2022.

NEMCHINSKY, V. A.; SEVERANCE, W. S. What we know and what we do not know about plasma arc cutting. **Journal of Physics D: Applied Physics**, Florence, v. 39, n. 22, p. 423-438, 2006. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/39/22/R01/meta>. Acess: 31 Dec. 2022.

OPERSAN. **Da geração à destinação:** como as indústrias metalúrgicas devem lidar com seus efluentes? [Barueri]: Opersan, 2021. Disponível em: <https://info.opersan.com.br/geracao-a-destinacao-efluentes-das-industrias-metalurgicas>. Acesso em: 18 dez. 2022.

OTTERBACH, J. C. H. **Espessura mínima e máxima de corte a laser em materiais perfilados.** [Porto Alegre]: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2011. Disponível em: https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/espessura_minima_e_maxima_de_corte_a_laser_em_materiais_perfilados.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

PARIS, A. A. F. **A velocidade de corte com plasma associada à formação de escórias.** Santa Maria: Ipen, [2000]. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/conem/2000/HC8644.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

QUADRILÁTERO IND. DE COMPONENTES PARA MÓVEIS. **Estampagem industrial:** aumente sua a produção e reduza custos. [Caxias do Sul]: Quadrilátero, 2017. Disponível em: <https://www.quadrilatero.ind.br/blog/estampagem-industrial-aumente-sua-a-producao-e-reduza-custos-81>. Acesso em: 26 nov. 2022.

RAMALHO, J. **Processo oxicorte.** [Osasco]: Infosolda o portal brasileiro da soldagem, [2013]. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/corte/processo-oxicorte.pdf>. Acesso em: 9 set. 2022.

RECH, M. **O corte com jato de água.** [São José]: Metal Rech, [2017]. Disponível em: <https://metaltrech.com.br/corteagua>. Acesso em: 06 ago. 2022.

REDAÇÃO INDÚSTRIA. **O processo de corte a Laser.** [Brasil]: Redação indústria, 2013. Disponível em: <https://industriaohje.com.br/o-processo-de-corte-a-laser>. Acesso em: 09 out. 2022.

REVISTA DO AÇO. **Processo de corte de metais por serra fita e serra circular.** [Boituva]: Revista do aço, [2017]. Disponível em: <https://www.ronemak.ind.br/single-post/2017/03/27/processo-de-corte-de-metais-por-serra-fita-e-serra-circular>. Acesso em: 14 ago. 2022.

RIBAS, R. **Aço tem aumento de 20% e já começa a ser repassado para a indústria.** [Rio de Janeiro]: O globo, 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/negocios/aco-tem-aumento-de-20-ja-comeca-ser-repassado-para-industria-25469194>. Acesso em: 05 dez. 2022.

RML. **10 Dicas essenciais para escolher uma lâmina de serra de fita.** [São Paulo]: Rml, 2021. Disponível em: <https://www.rmlmaquinas.com.br/loja/noticia.php?loja=762235&id=113>. Acesso em: 18 set. 2022.

RODOAÇOS, S. **O que é oxicorte:** saiba mais sobre esse procedimento. [São Paulo]: Rodoaços, 2021. Disponível em: <https://rodoacos.com.br/2021/07/05/o-que-e-oxicorte-saiba-mais-sobre-esse-procedimento/>. Acesso em: 23 jul. 2022.

SELLITTO, M. A.; MURAKAMI, F. K. Destination of the waste generated by a steelmaking plant: a case study in Latin America. **AESTIMUM**, Porto Alegre, v. 77, p. 127-144, 2015. Available from: file:///C:/Users/pbl543/Downloads/riccardo,+OP04091_Aestimum_77_127-144_20210312_1526.pdf. Access: 18 Dec. 2022

SERRAMETAL. **Oxicorte**. [São Paulo]: Serrametal, 2022. Disponível em: <https://serrametal.com.br/oxicorte/>. Acesso em: 05 dez. 2022.

SILVA; GASPAROTTO, M. S. A importância da qualidade na evolução do corte a plasma na indústria do metalmeccânica. **Simpósio de Tecnologia da FATEC Taquaritinga**. Taquaritinga, v. 6, n. 1, p. 286-298, 2019. Disponível em: <https://simtec.fatectq.edu.br/index.php/simtec/article/view/463/313>. Acesso em: 18 dez. 2022.

SILVA, L. R. **Avaliação de resíduos produzidos em farmácias magistrais em uma cidade no centro norte goiano**. 2018. Dissertação (Pós graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente) - Centro universitário de anápolis – Unievangélica. Anápolis, 2018. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/1916/1/Luciano%20Ribeiro.pdf>. Acesso em: 26 out. 2022.

SIRTOLI, S. **Projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do sul, 2013. Disponível em: <https://repositorio.uces.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1839/TCC%20Samuel%20Sirtoli.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 dez. 2022.

SOARES, L. R.; NASCIMENTO, T. S. **Comparação entre os processos de corte a plasma**. [Osasco]: Infosolda o portal brasileiro da soldagem, 2016. Disponível em: https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/Comparao%20entre%20os%20processos%20de%20corte%20a%20plasma%20e%20oxi-combustvel.pdf. Acesso em: 05 dez. 2022.

TRUMPF. **Página inicial**. [Barueri]: Trumpf, [2020]. Disponível em: https://www.trumpf.com/pt_BR/solucoes/aplicacoes/corte-a-laser/. Acesso em: 14 ago. 2022.

UNISTAMP. **Guilhotina industrial para chapas**. Unistamp, 2019. Disponível em: <https://www.unistamp.com.br/guilhotina-industrial-chapas>. Acesso em: 23 out. 2022.

URTADO; LIMA; BAINO. **Comparativo entre a produtividade e custo operacional dos processos térmicos oxicorte, plasma e laser, para cortar o material aço carbono entre as espessuras de 6 à 25mm**. Rio de Janeiro: [Infosolda o portal brasileiro da soldagem, 2013]. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/corte/comparativo-entre-a-produtividade-e-custo.pdf>. Acesso em: 29 out. 2022.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. Sustentabilidade na Construção Civil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP, 3., 2011, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: advances in cleaner production , 2011. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/third/files/sessoes/6B/8/Yemal_JA%20-%20Paper%20-%206B8.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

ZHANG, A. **Corte a laser vs. corte a jato de água vs. corte de plasma vs. corte a fio (a diferença final)**. [Jiangsu, China]: Vistmac, [2021]. Disponível em: <https://www.vistmac.com/pt/corte-a-laser-versus-corte-a-jato-de-agua-versus-corte-a-plasma-versus-corte-a-fio/#:~:text=O%20corte%20por%20jato%20de%20%C3%A1gua%20%C3%A9%20capaz,20%20mm%20de%20espessura%20apresenta%20o%20melhor%20custo-benef%C3%ADcio>. Acesso em: 11 out. 2022.

ZILLI, J. P. **Equipamentos para corte de barras e chapas nitaplast**. [São Paulo]: Nitplast, 2011. Disponível em: http://nitaplast.com.br/pdf/boletim_tecnico_1.pdf. Acesso em: 29 nov. 2022.