

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**INFLUÊNCIA DA CAMADA CEMENTADA NO
PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO
FW RADIAL NO AÇO 1045**

RODRIGO DE BARROS SILVA

**Pindamonhangaba - SP
2020**

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**INFLUÊNCIA DA CAMADA CEMENTADA NO
PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO
FW RADIAL NO AÇO 1045**

RODRIGO DE BARROS SILVA

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba para graduação, no Curso Superior de Tecnologia em Soldagem.

Área de Concentração: Ultrassom

Orientador: Emerson Augusto Raymundo

**Pindamonhangaba - SP
2020**

Si381i

Silva, Rodrigo de Barros.

Influência da camada cementada no processo de soldagem por fricção FW radial no aço 1045 / Rodrigo de Barros Silva / FATEC Pindamonhangaba, 2020.
63f.: il.

Orientador Professor Dr. Emerson Augusto Raymundo
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba. 2020

1. Soldagem por fricção. 2. FW. 3. Morfologia. 4. ZTA.
4. Análises Metalográficas. I. Silva, Rodrigo de Barros. II.
Raymundo, Emerson Augusto. III. Título.

CDD 669

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**INFLUÊNCIA DA CAMADA CEMENTADA NO
PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO
FW RADIAL NO AÇO 1045**

RODRIGO DE BARROS SILVA

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Mecânica: Processos de
Soldagem.

Comissão Examinadora

EAW

Orientador – Prof. Dr. Emerson Augusto Raymundo

marcelo B. de Carvalho

Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho

mm

Membro – Sr. Murilo Miranda de Barros

Pindamonhangaba, 21 de fevereiro de 2020.

DEDICATÓRIA

Eu dedico esse trabalho aos professores da FATEC, pois sem o comprometimento, o amor ao ensino, à paciência que eles me deram nos momentos em que mais precisei, provavelmente eu não teria concluído este curso.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Ao professor Emerson, pelo inestimável apoio na orientação deste trabalho. Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

SILVA, Rodrigo de Barros. **Influência da camada cementada no processo de Soldagem por fricção FW radial no aço 1045**. 2020. 63p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba, 2020.

RESUMO

O trabalho apresenta uma proposta de projeto que identifica a influência da camada cementada no processo por fricção FW radial no aço 1045. A procura por soldagem que não apresente tanto problema na Zona Termicamente Afetada (ZTA) é propósito de qualquer processo de soldagem, neste sentido a soldagem por fricção apresenta um caminho para diminuir esses efeitos. O objetivo do trabalho foi desenvolver por meio de análises metalográficas e propriedades mecânicas uma análise do aço 1045 soldado pelo processo de fricção radial. Foram observadas mudanças na morfologia dos cavacos e na estrutura do material que segundo a teoria pode mudar conforme a dureza do material envolvido quando são formados nos processos de usinagem. Para verificar as diferenças no processo foram analisadas alterações na composição química, dureza, tratamento de superfície e microestrutura em suas diferentes partes.

Palavras chaves: Soldagem por fricção; FW; Morfologia; ZTA; Análises Metalográficas.

SILVA, Rodrigo de Barros. **Influência da camada cementada no processo de Soldagem por fricção FW radial no aço 1045**. 2020. 63p. Trabalho de Graduação (Curso de Tecnologia em Soldagem). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba, 2020.

ABSTRACT

The work presents a project proposal that identifies the influence of the seed layer in the process by radial FW friction on 1045 steel. The search for welding that does not present so many problems in the Zona Termicamente Afetada (ZTA), that is, in the thermally affected zone, is the objective of any welding process, in this sense, friction welding presents a way to reduce these effects. The objective of the work was to develop, through metallographic analysis and mechanical properties, an analysis of 1045 steel welded by the radial friction process. Changes in chip morphology and material structure were observed, which according to theory can change according to the hardness of the material involved when they are formed in machining processes. To verify the differences in the process, changes in chemical composition, hardness, surface treatment and microstructure in its different parts were analyzed.

Keywords: Friction welding; FW; Morphology; ZTA; Analy Metallographic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico de tempo X profundidade de cementação	26
Figura 2 – Sequência básica de soldagem por fricção.	28
Figura 3 – Esquema microscópico das superfícies em atrito	39
Figura 4 – Equipamento básico para soldagem por fricção	30
Figura 5 – Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais.....	30
Figura 6 – Diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos.....	34
Figura 7 – Principais operações de torneamento.....	36
Figura 8 – Torneamento cilíndrico externo.....	37
Figura 9 – Distribuição do material da peça durante a formação do cavaco.	38
Figura 10 – Esquema da formação do cavaco mostrando o plano de cisalhamento	40
Figura 11 – Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco.....	41
Figura 12 – Formação das zonas de cisalhamento	43
Figura 13 – Tipos de cavacos de usinagem	43
Figura 14 – Formas de cavaco	44
Figura 15 – Imagem das hastes amortecedor com 80 quilômetros	45
Figura 16 – Imagens da máquina utilizada para o processo de fricção	46
Figura 17 – Imagens do torno e Ferramenta Faca utilizada no torneamento	47
Figura 18 – Sequências da soldagem das hastes soldadas pelo processo de fricção radial.....	48
Figura 19 – Imagens (a) durômetro da Fatec/Pinda e da amostra analisada (b)	49
Figura 20 – Imagens metalográficas com as medidas das camadas temperadas	50
Figura 21 – Imagens da amostra usinada, nital 2%.....	52
Figura 22 – Imagens da amostra não usinada, nital 2%.....	55
Figura 23 – Imagens de haste zero quilômetro.....	57

Figura 24 – Cavacos do processo de torneamento do aço cementado 1045

.....58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de dureza da amostra não usinada	49
Tabela 2 – Composição químicas das amostras das haste	51
Tabela 3 – Resultados de dureza da amostra usinada	51

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Justificativa.....	20
1.2	Objetivo Geral	21
1.3	Objetivos específicos.....	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.	SOLDABILIDADE AÇO SAE 1045	24
4.	TRATAMENTO TERMICO NO AÇO SAE 1045	24
5.	CEMENTAÇÃO NO AÇO SAE 1045	25
6.	PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO FRW	27
6.1.	Metodologia do processo por Fricção FW.....	29
6.2.	Equipamentos do processo FW	30
6.3.	Propriedades mecânicas do processo FW.....	31
6.4.	Qualidade da solda do processo FW	32
6.5.	Aplicações do processo FW.....	32
7.	USINAGEM.....	33
8.	TORNEAMENTO.....	33
9.	Mecanismo de Formação de Cavaco	37
9.1.	Tipos de Cavacos.....	42
10.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
11.	RESULTADOS E DISCUSSões	48
12.	CONCLUSÃO	60

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste em uma análise da influência da camada cementada no processo de soldagem por fricção radial no aço 1045, da qual é de grande importância para as indústrias um bom conhecimento a respeito do material utilizado em um amortecedor, pois é um equipamento de grande responsabilidade tratando-se da segurança dos ocupantes do veículo.

O processo de soldagem tem recebido nos últimos anos grande interesse devido a sua versatilidade, sendo considerado atualmente um método muito importante na união de metais para a construção de peças e estruturas. Este método tem importante aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios ou estruturas compostas por centenas de toneladas, tendo sua aplicação desde estruturas simples até estruturas com elevado grau de responsabilidade. (AMANCIO, 2013).

A soldagem abrange um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças. Soldagem pode ser definida como sendo o processo de união de metais por fusão, ou ainda, a operação que visa obter a união de duas ou mais peças assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas. (AMANCIO, 2013).

O processo de soldagem por fricção é um processo em amplo crescimento, pois em sua grande maioria não apresenta a zona termicamente afetada e a rapidez de seu processo diminui a expansão térmica dos componentes envolvidos. Atualmente a indústria aeronáutica está em ampla utilização principalmente em ligas de alumínio. Os processos de fricção podem ser divididos em fricção horizontal utilizando de máquinas similares como máquinas ferramenta de torno e por fricção por estiramento também parecido com uma ferramenta de processo de fresamento, neste caso se limita a peças mais finas. (AMANCIO, 2013).

A usinagem é um processo tecnológico que conduz os materiais a comportamentos diferentes perante a corrosão e resistência mecânica. Uma das maneiras de se entender o processo de usinagem é o estudo da morfologia dos cavacos, já que ele pode revelar se os parâmetros e a escolha da ferramenta estão corretos ou não. O cavaco é material removido pela ação de uma

ferramenta de corte. O mecanismo de construção não é tão óbvio e fácil de explicar, pois a interação entre peça e ferramenta não é um simples fato de corte onde o mais duro corta ou risca o mais mole. O estudo experimental da usinagem é de essencial importância, pois a teoria da plasticidade não permite explicar satisfatoriamente os fenômenos observados. (AMANCIO, 2013).

A metodologia a ser desenvolvida se baseia na soldagem por fricção de duas barras. Na soldagem por fricção será feita uma adaptação em um torno convencional. Depois de soldados por meio do processo FW será usinado um corpo de prova por meio de um torno convencional onde serão analisadas as três regiões da soldagem por meio da metalografia, medida de dureza, composição química, microscopia ótica e de varredura. (AMANCIO, 2013).

Por consequência será relacionadas às microestruturas dos cavacos do Aço 1045 com os parâmetros de usinagem utilizados em torneamento. Contudo as micrografias geradas poderão revelar as condições do processo. Os cavacos em sua maioria apresentaram morfologia peculiar de um material cisalhante. Além disso, regiões de alta deformação caracterizada por bandas de cisalhamento nos contornos dos segmentos de uma porção para outra. Tais aspectos são específicos na deformação plástica dos processos de conformação e que em processos de usinagens também ocorrem, porém, de forma rápida e dinâmica. A ferramenta de corte utilizada para o processo de torneamento será de metal duro do tipo alisadora. As variáveis de controle de processos serão velocidade de corte, avanço e a geometria da ferramenta e no caso a variável de controle o estudo dos cavacos. (AMANCIO, 2013).

As diferentes etapas do trabalho de usinagem serão divididas então em: escolha dos cavacos em prévia avaliação na busca da identificação pelo tipo e forma do cavaco para análise em microscopia; será analisada a morfologia dos cavacos e a estereologia dos grãos; as regiões de bandas de deformação serão identificadas e medidas; os valores serão relacionados com a velocidade de corte e avanço utilizados nos processos. Para as análises da morfologia dos grãos será utilizado um software de processamento análise de imagem de domínio público. (AMANCIO, 2013).

Por meio dos resultados das análises dos contornos de grãos, das durezas, da composição química das fases obtidas, das regiões de soldagem,

dos cavacos, da superfície usinada, da ferramenta de corte utilizadas poderão obter relações, comparações entre o processo de soldagem por fricção, entre os valores das variáveis de entrada da usinagem do processo de usinagem sem soldagem. E também por meio desse projeto proposto discriminar e viabilizar as variáveis escolhidas. Espera-se que o comportamento do processo de soldagem por fricção se comporte de forma satisfatória com relação à zona termicamente afetada já que é considerado um processo autógeno, com a morfologia dos cavacos e com a superfície usinada. (AMANCIO, 2013).

O tema foi escolhido visto que havia uma ausência nesse tipo de pesquisa envolvendo a melhor soldagem e usinagem do Aço 1045 no processo de soldagem por fricção radial com relação a suas propriedades mecânicas e químicas, já que diariamente são utilizados em indústrias químicas, petroquímicas, marinha, geração de energia, aeronaves, engenharia automotiva, ferroviária entre outras.

1.1 Justificativa

Segundo Benedetti (2003) apud Amancio (2013) os processos de soldagem em sua maioria geram zonas termicamente afetadas, esses fenômenos normalmente são evidentes em processos que envolvem fusão dos componentes. Muitas empresas têm buscado soluções para diminuir as zonas afetadas termicamente, porém este desafio acaba aumentando a complexidade do processo e as vezes encarecendo. Muitos outros processos vêm sendo utilizados e pesquisados em determinadas possibilidades.

Devido principalmente as esses fatos a soldagem por fricção vem tomando espaço nas indústrias e também objeto de pesquisa. Atualmente vem sendo desenvolvido equipamentos para os processos de soldagem radial e por estiramento, além disso, algumas máquinas também estão sendo adaptadas para soldagem destes processos.

Com relação aos alcances dos processos e pesquisa da soldagem por fricção estão sendo pesquisados soldagem autógena e por materiais dissimilares, quanto estes pode se diversificar tanto na natureza dos materiais envolvidos quanto na geometria, ou seja, podendo soldar, por exemplo, por diâmetros diferentes.

Algumas empresas estão investindo muito na soldagem por fricção tanto a radial quanto por estiramento, por exemplo, da área de aviação onde a exigência é muito maior com relação a propriedades mecânicas tais como, resistência à fadiga. Essa propriedade é muito importante, pois ela está ligada a estrutura interna e acabamento das peças, visto que a maioria das trincas se iniciam na superfície. Neste sentido relacionar a usinagem com a soldagem passa a ser um fator importante, já que o comportamento do material perante a ferramenta de corte pode variar tanto ao longo da peça quanto a região da solda, como isso já foi evidenciado em trabalhos científicos pelo próprio autor.

Portanto, estudar a soldagem da fricção sob o aspecto metalúrgico e da usinagem pode trazer uma contribuição muito grande para os processos de soldagem e da usinagem. Sendo assim aspectos, propriedades tanto mecânicas, tecnológicas e físico-químicos, tais como, zona termicamente afetada, dureza, difusão, fenômeno do atrito, esforços, composição química, tratamento térmico, geometrias, usinabilidade, cavacos, ferramentas de corte, controle de

resfriamento e aquecimento tanto na usinagem quanto na soldagem, resistência à fadiga, tração e impacto podem trazer soluções e novos desenvolvimentos na soldagem de fricção de várias matérias.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo foi analisar a influência da camada cementada na haste do amortecedor veicular soldado por meio do processo de Soldagem por Fricção FW radial no aço 1045 para verificar possíveis alterações na composição química, dureza e microestrutura em suas diferentes partes.

1.3 Objetivos específicos

- Soldar materiais por fricção radial autógena.
- Analisar metalurgicamente a soldagem por fricção por meio de análises metalográficas, ensaio destrutível por dureza.
- Alterações ocorridas durante a soldagem por Fricção na haste do amortecedor veicular comprovadas por meio dos ensaios Metalográficos.
- Verificar as fases e as inclusões no material com auxílio de pesquisas de outros autores para explicar o comportamento deles no trabalho proposto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o aço SAE 1045 é classificado como aço de médio teor de carbono com 0,45% de carbono em sua composição. Possui boas propriedades mecânicas, como boa usinabilidade quando normalizado ou laminado a quente. Sua resistência mecânica varia entre 570 e 700 Mpa e dureza Brinell entre 170 e 210HB.

- Aplicações do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) É um aço muito utilizado pelas indústrias devido a suas características mecânicas, utilizado em componentes estruturais e de máquinas, virabrequim, eixos, engrenagens, peças forjadas entre outras.

- Composição Química Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o Aço SAE 1045 possui composição química de Carbono (0,43% - 0,50%), Silício (0,15% - 0,35%), Manganês (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx) e Enxofre (0,05% máx).

- Densidade do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o aço SAE 1045 possui uma densidade de 7.87 g/cm³ ou 0.284 lb/in³.

- Limite de Escoamento do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o limite de Escoamento ou tensão de Escoamento do aço SAE 1045 é de 450 Mpa ou 65300 psi.

- Resistência a Tração do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) a Resistência a Tração do Aço SAE 1045 é de 585 Mpa ou 84800 psi.

- Tensão Admissível do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) a Tensão Admissível do Aço SAE 1045 depende diretamente do coeficiente de Segurança do Projeto.

- Módulo de Elasticidade do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o módulo de Elasticidade do Aço SAE 1045 é de 190 GPa (27557 Ksi) podendo chegar a 210 GPa (30458 Ksi).

- Coeficiente de Poisson do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o coeficiente de Poisson do Aço SAE 1045 varia entre 0,27 e 0,30.

- Dureza Brinell do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) a Dureza Brinell do Aço 1045 é de 163.
- Dureza Rockwell B do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) a Dureza Rockwell B do Aço 1045 é de 84.
- Dureza Vickers do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) a Dureza Vickers do Aço SAE 1045 é de 170.
- Condutividade Térmica do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) a Condutividade Térmica do Aço SAE 1045 é de 51,9 W/mK.
- Usinabilidade do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) a Usinabilidade do Aço SAE 1045 é muito boa quando está na condição Normalizada ou Laminada.
- Soldagem do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) o Aço SAE 1045 pode ser soldado com um procedimento de soldagem (EPS) adequado como, por exemplo: Utilização de Eletrodos com baixo teor de hidrogênio, Preaquecimento entre 200°C e 300°C E Alívio de Tensões entre 550°C e 650°C.
- Forjamento do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) o Aço SAE 1045 pode ser forjado entre 850°C E 1250°C.
- Recozimento do Aço SAE 1045
Segundo ASTM (2008) É possível recozer totalmente o Aço SAE 1045 em temperaturas entre 800°C e 850°C. Seguindo-se a um resfriamento bem lento dentro do forno.
- Normalização do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o Aço SAE 1045 pode ser normalizado entre 870°C e 920°C. O resfriamento de ser feito fora do forno em ar calmo.

- Alívio de Tensões do Aço SAE 1045

Segundo ASTM (2008) o aço SAE 1045 pode ser aliviado entre 550°C e 660°C. Normalmente as normas pedem 1 hora de encharque (uniformização da temperatura) de 1 hora por 25mm de espessura do material.

- Revenimento do Aço SAE 1045
- O revenimento do Aço SAE 1045 de ser executado entre 400°C e 650°C.

3. SOLDABILIDADE AÇO SAE 1045

Segundo a American Welding Society (AWS) a soldagem do aço SAE 1045 se deve considerar que se trata de um aço de médio carbono que precisa de um ciclo térmico controlado durante a soldagem devido à suscetibilidade à formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade (frágil).

A American Welding Society (AWS) relata que soldabilidade define-se como a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço. A soldabilidade de um material é definida pela formação da junção permanente por solda entre dois materiais para um determinado processo de soldagem. Outro ponto importante que vem de encontro à soldabilidade é a energia de soldagem, que é a quantidade de calor adicionada a um material por unidade de comprimento que é a principal característica que distingue os processos de soldagem.

4. TRATAMENTO TERMICO NO AÇO SAE 1045

Segundo a American Welding Society (AWS) os Tratamentos termoquímicos são processos que visam a adição, por difusão, de elementos

químicos (carbono, nitrogênio e boro, entre outros) na superfície do aço e nas seções onde se quer endurecer. Como a difusão desses elementos é feita com o aquecimento do aço entre 300° e 1200°C, o tratamento é denominado termoquímico.

A aplicação de calor por um meio apropriado pode levar a essa alteração de composição química do aço até uma profundidade que depende da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura de tratamento em contato com o meio em questão. A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratamento térmico apropriado, produz também uma alteração na estrutura do material, resultando em uma modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas.

O objetivo, normalmente, é o de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste superficial, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil, embora possa ser aplicado com outros propósitos, como o de aumentar à resistência a fadiga, à corrosão, à oxidação em altas temperaturas.

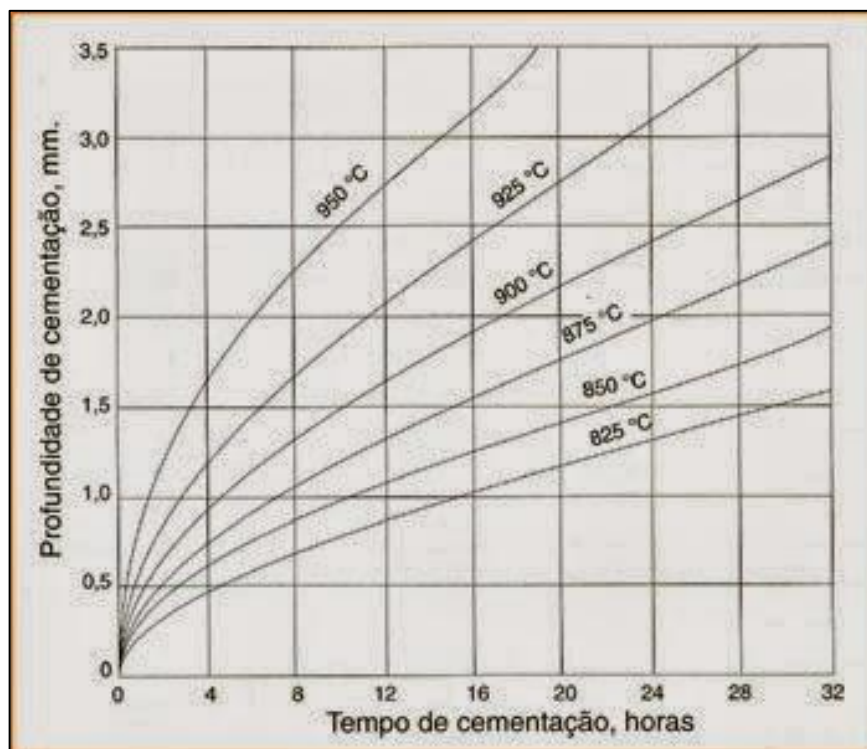
5. CEMENTAÇÃO NO AÇO SAE 1045

O processo de cementação é um processo clássico de endurecimento superficial, isto é, o enriquecimento superficial de carbono de certos aços, aquecidos convenientemente em contato com substâncias ricas em carbono. A cementação, além de ser a aplicação de carbono em aços com baixo teor de carbono, a mesma só ocorre para aços austeníticos, pois a austenita é a estrutura que apresenta elevada solubilidade para o carbono em sua estrutura cristal estável. Consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de temperado, apresente uma superfície mais dura. Para que isso ocorra, é necessário que o aço, em contato com a substância capaz de fornecer carbono, seja aquecido a uma temperatura que a solução do carbono no ferro seja fácil. Para isso, a temperatura deve ser superior à zona crítica (850° a 950°C), ou seja, onde o ferro se encontrará na forma alotrópica gama, embora tenham sido usadas temperaturas mais baixas como 790°C e mais elevadas como 1095°C. (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Além disso, há uma variável contributiva com o tempo e a atmosfera que a cementação é feita, que é o potencial carbono, que é a quantidade máxima de teor de carbono que pode ser acrescentado a um certo aço em uma certa temperatura com sua atmosfera controlada. (FARIA, BRACARENSE, 2003).

A profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo, sendo rápida a princípio, decrescendo após um tempo, o que pode ser visto na figura 1. Essas curvas permitem verificar também que as temperaturas mais elevadas favorecem a penetração de carbono. Essas profundidades são geralmente entre 0,25 a 2,5 mm e as peças mecânicas que são fortemente solicitadas têm uma profundidade de cementação maior. (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Figura 1 - Gráfico de tempo X profundidade de cementação



Fonte: FARIA BRACANESI (2003)

Fundamentalmente, a cementação é um fenômeno difusivo, e adicionando ao potencial carbono, é relativo ao movimento de carbono no interior do aço. Portanto a velocidade de enriquecimento superficial de carbono nos aços depende, em primeiro lugar do seu coeficiente de difusão.

Foram estabelecidos alguns fatores que influencia sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços, usando como prerrogativa que a cementação é influenciada pela fonte de suprimento de carbono, os fatores são:

Teor inicial de carbono no aço: quanto menor o teor de carbono no aço, maior a velocidade de carbonetação.

Coeficiente de difusão do carbono no aço: é fundamental para a cementação, pois o enriquecimento superficial de carbono é um fenômeno de difusão, isto é, de movimento relativo de carbono no interior do aço. O que é visado na carbonetação é a solução do carbono no ferro gama. Este coeficiente de difusão, é uma função da temperatura e da concentração de carbono. Sendo não afetado por impurezas, tamanho de grão e nem de elementos de ligas nos teores que são usualmente encontrados nos aços ligas para cementação. (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Temperatura: é o fator mais importante além de afetar a difusão acelerando-a com a sua elevação, também na concentração de carbono na austenita e na velocidade de reação de carbonetação na superfície do aço. (FARIA, BRACARENSE, 2003).

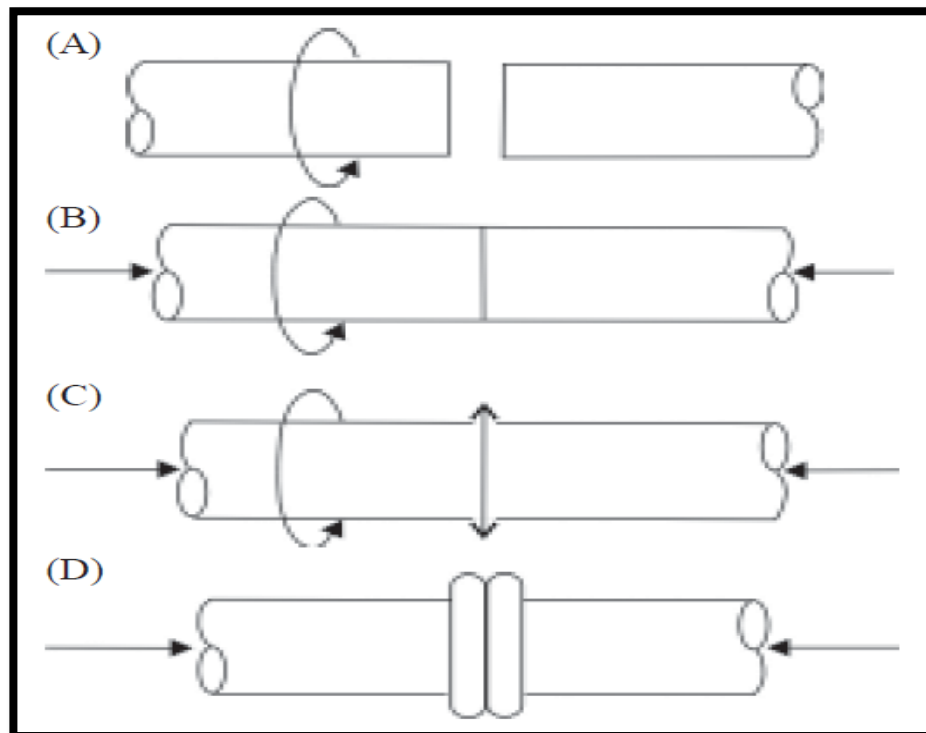
6. PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO FRW

A soldagem por atrito é um processo de união no estado sólido, no qual a coalescência entre as peças metálicas é obtida por aquecimento, através do atrito (FARIA, BRACARENSE, 2003).

O processo é descrito abaixo e mostrado na figura 1 Sequência básica de soldagem por fricção.

- (A) Disposição inicial das peças a serem soldadas, peça a direita com velocidade constante e à esquerda parada.
- (B) Contato inicial entre as peças, através das forças aplicadas no sentido axial. Este contato gera calor aquecendo as superfícies devido ao atrito.
- (C) Deformação plástica devido ao aumento da força axial e do aquecimento.
- (D) Caldeamento e forjamento da junta soldada.

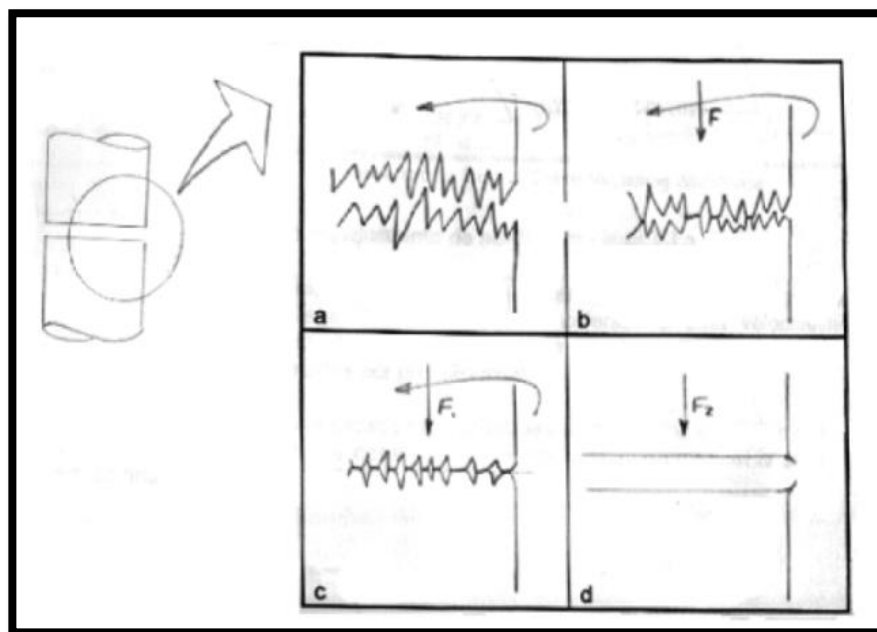
Figura 2 – Sequência básica de soldagem por fricção.



Fonte: Faria, Bracarense (2003).

Segundo Silva, Gimenez (2012), com esta aproximação das superfícies há um aquecimento localizado que a princípio ocorre somente nas partes salientes destas superfícies, onde há atrito e conseqüentemente nestes pontos que estão a uma temperatura elevada há fusão e no instante seguinte são cisalhados devido ao movimento da peça, conforme pode se observar na figura 2, esquema microscópico das superfícies em atrito.

Figura 3 – Esquema microscópico das superfícies em atrito.



Fonte: INFOSOLDA (2012).

A solda é feita em poucos segundos, tem alta resistência e a zona termicamente afetada (ZTA) é estreita. Este processo é aplicável a diversos materiais, similares ou não (FARIA, BRACARENSE, 2003).

6.1. Metodologia do processo por Fricção FW

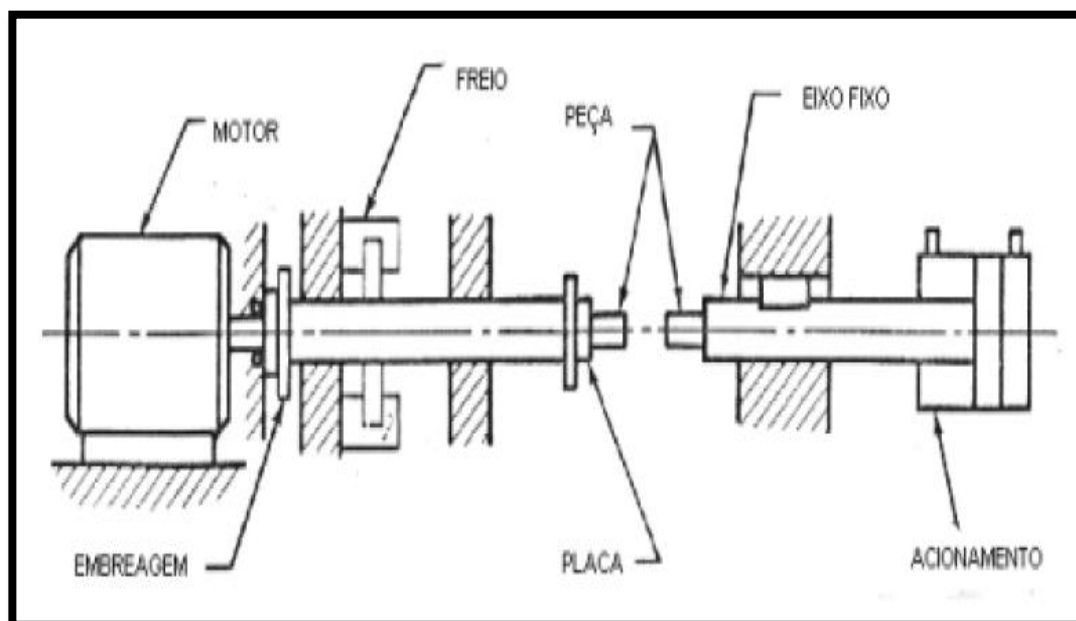
As peças a serem soldadas são fixadas nas garras da máquina de soldar. Uma das peças é acelerada até atingir a velocidade de soldagem pré-determinada por intermédio de uma unidade motora. A outra peça que está parada é deslocada por uma força axial de atrito até tocar a peça que está girando. Este contato provoca o aquecimento das superfícies devido o atrito.

Quando as superfícies em contato atingem a temperatura de forjamento dos materiais, a unidade motora é desacoplada da peça que está em rotação e a força axial é aumentada, atingindo a força axial de forjamento. Esta é mantida até que as juntas estejam soldadas (FARIA, BRACARENSE, 2003).

6.2. Equipamentos do processo FW

O equipamento básico para a soldagem por atrito consiste de cabeçote de fixação das peças (garras), sistemas para movimento de rotação e sistema para aplicação de forças axiais (pressão) (FARIA, BRACARENSE, 2003). Na figura 3 a seguir pode-se observar o equipamento básico para soldagem por fricção.

Figura 4 – Equipamento básico para soldagem por fricção



Fonte: FARIA, BRACARENSE (2003)

4.3 Materiais soldáveis no processo FW

A maioria dos metais pode ser soldado por atrito, com exceção para o ferro fundido, porque o grafite age como lubrificante. Certas ligas que possuem baixo coeficiente de atrito, como bronze e latão com mais de 0,3 Pb. Certos aços

com inclusão de sulfetos de manganês também não podem ser soldados devido à formação das fases frágeis na solda (FARIA, BRACARENSE, 2003). O quadro 01 apresenta as principais possibilidades dos materiais soldáveis por fricção.

Figura 5 – Possibilidade da aplicação da soldagem por atrito para alguns materiais.

	Al	Bronze	Cu	Cu-Ni	Mg	Monel	Ni	Aço Baixa Liga	Aço C	Aço Usinagem Fácil	Aço Inox	Aço Ferramenta	Ti	W	Material Valvulas
Al	■		■		■		■	■	■		■		■		
Bronze		■													
Cu	■		■						■		■		■		
Cu-Ni				■					■		■				
Mg	■				■										
Monel						■		■	■	■	■				
Ni	■						■	■	■	■	■	■			
Aço Baixa Liga	■					■	■	■		■	■	■			■
Aço C	■		■	■		■	■	■	■	■	■	■			■
Aço Usinagem Fácil						■	■		■	■	■	■			■
Aço Inox	■		■	■		■	■	■	■	■	■	■	■		■
Aço Ferramenta						■	■	■	■	■	■	■			
Ti	■												■		
W														■	
Material Valvulas							■	■	■	■	■				■

■ Boa Soldabilidade
 ■■■■■ Dificil Soldabilidade
 Não soldável

Fonte: INFOSOLDA (2012)

6.3. Propriedades mecânicas do processo FW

Como não há fusão do material a ser soldado, nem material de adição, gás de proteção e escória, as propriedades mecânicas da solda são próximas à do metal de base. A variação de dureza ao longo da zona termicamente afetada (ZTA) é muito pequena. A resistência à fadiga também não é muito afetada,

principalmente quando o material for temperado e revenido após a soldagem (FARIA, BRACARENSE, 2003).

6.4. Qualidade da solda do processo FW

A qualidade da solda depende da escolha correta das variáveis de processo. Por ser um tipo de soldagem no estado sólido e por não necessitar de metal de adição ou mesmo fluxos, praticamente não ocorrem defeitos como: poros devido a gases, inclusões de escória e fase frágeis. Os defeitos mais comuns são: cisalhamento na zona afetada pelo calor (baixa velocidade inicial ou volante superdimensionado) e defeitos centrais causados por pequenos orifícios no centro uma das peças (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Os tipos de exame mais utilizados são: a inspeção visual e a medida do comprimento da peça. Os ensaios de tração, flexão, impacto e fadiga podem ser utilizados para controle de qualidade (FARIA, BRACARENSE, 2003).

Geralmente faz-se também uma metalografia da junta soldada, bem como medidas de dureza ao longo da zona afetada pelo calor (FARIA, BRACARENSE, 2003).

6.5. Aplicações do processo FW

A soldagem por fricção é aplicada em diversas indústrias:

- Aviação
- Metal mecânica
- Petrolífera
- Militar
- Agrícola
- Automobilística

7. USINAGEM

Como operações de usinagem entendemos aquelas que, ao conferir à forma, ou dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer destes três itens, produzem cavaco. Definimos cavaco, a porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. Além desta característica, estão envolvidos no mecanismo da formação do cavaco alguns fenômenos particulares, tais como o recalque, a aresta postiça de corte, a craterização na superfície de saída da ferramenta e a formação periódica do cavaco (dentro de determinado campo de variação da velocidade de corte (FERRARESI, 1970)).

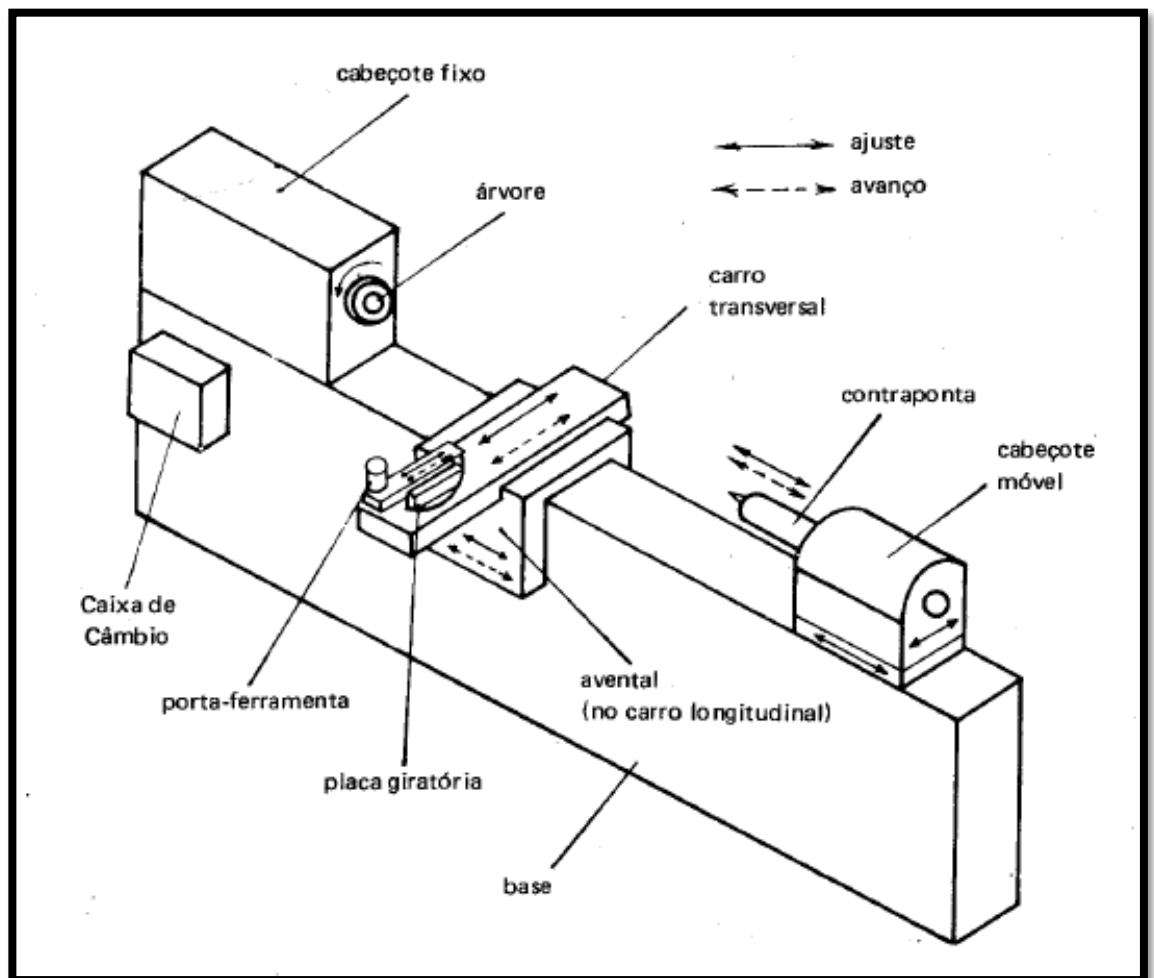
O número de operações de usinagem é muito grande, assim como é grande a variedade de máquinas operatrizes e ferramentas de corte. No entanto será abordado no presente trabalho apenas o processo a ser utilizado, o processo de torneamento.

8. TORNEAMENTO

Processo mecânico da usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1970).

Conforme Chiaverini (1986), a figura 4 representa um diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos.

Figura 6 - Diagrama das principais partes componentes de um torno e seus movimentos.



Fonte: CHIAVERINE (1986)

O torno representado é chamado torno mecânico, torno paralelo ou torno universal. É o tipo mais generalizado e presta-se a um grande número de operações de usinagem. Basicamente, o torno mecânico é constituído de uma base maciça e rígida, para resistir a deformações e apresentar suficiente capacidade de amortecimento das vibrações resultantes das operações de

usinagem. A peça a ser usinada é fixada numa placa de castanhas, suportada pela árvore principal que faz parte do cabeçote fixo. A árvore principal é dotada de um movimento de rotação contínuo que se transfere a peça, que, por sua vez, é submetida à ação de uma ou várias ferramentas, de modo a ter material arrancado. A árvore deve ser capaz de girar com velocidades periféricas diferentes, as quais são estabelecidas em função do diâmetro das peças sob usinagem, do tipo de acabamento desejado, do tipo de operação planejada (desbaste, acabamento etc.) do tipo de material etc (CHIAVERINI, 1986).

Uma caixa de engrenagens (ou de câmbio), convenientemente localizada, permite a mudança de velocidade da árvore (CHIAVERINI, 1986).

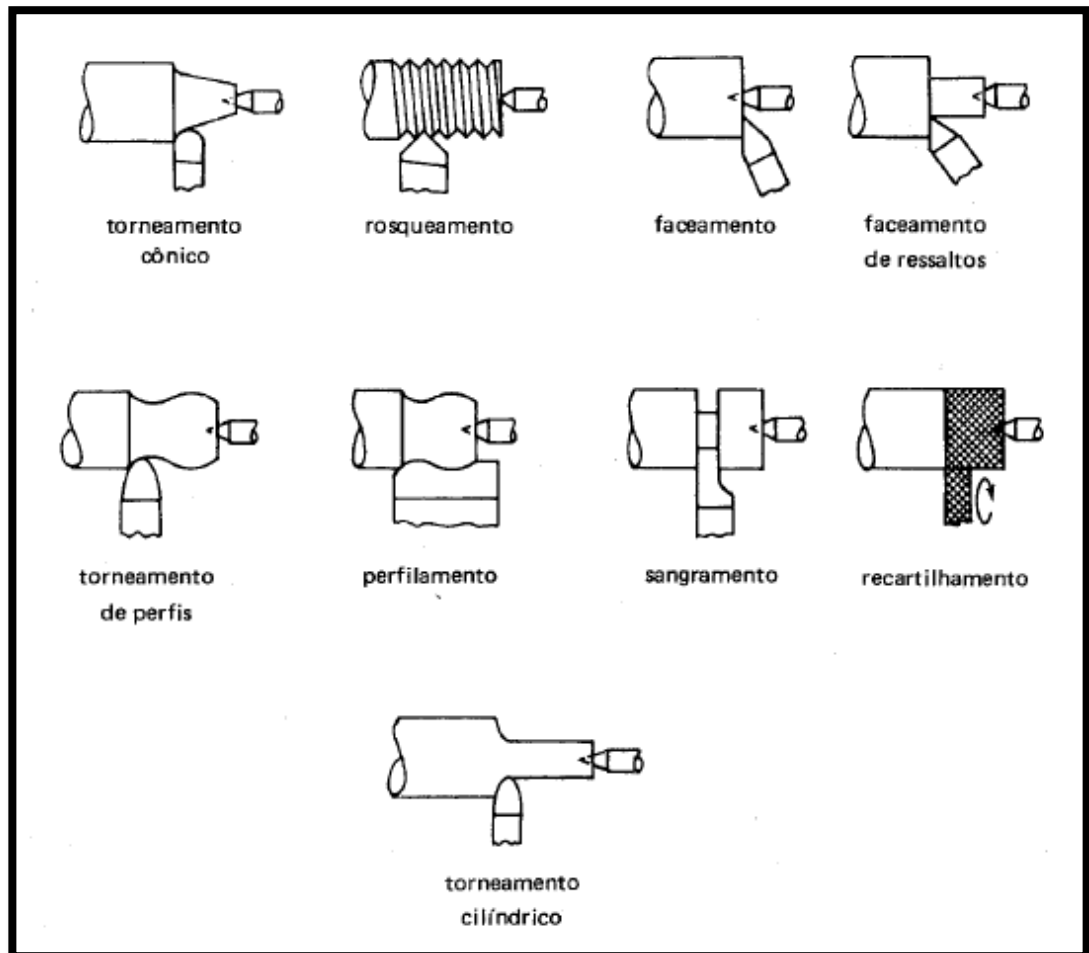
Na parte central está situado o *carro porta-ferramentas*, montado sobre *avental*. O conjunto – carro porta-ferramentas e avental – é projetado de modo a ser dotado de movimentos longitudinal e transversal; assim, a ferramenta pode deslizar, se necessário, segundo uma linha oblíqua, ou seja, uma linha resultante dos movimentos longitudinal e transversal. O *avanço* da ferramenta pode ser realizado manualmente ou automaticamente. No conjunto carro porta-ferramentas e avental, situa-se, ainda, uma placa giratória, que gira e torno de um eixo vertical, de modo a ser colocada em qualquer ângulo em relação ao eixo da peça sob usinagem (CHIAVERINI, 1986).

Na outra extremidade do torno situa-se o *cabeço móvel*, cujo objetivo é suportar as peças que giram. Compõe-se de um suporte fundido, de uma *contraponta* e de dispositivos diversos como *mangote*, *volante* e outros. O mangote não gira; porém pode deslocar-se alguns centímetros no sentido longitudinal e ser travado na posição desejada. O cabeçote móvel é oco e possui um cone interno onde podem ser fixadas diversas ferramentas, como brocas helicoidais, alargadores, machos de roscamento, além das contra-pontas, os quais são avançados de encontro às peças (CHIAVERINI, 1986).

Os tornos possuem uma série de acessórios – que contribuem para torná-los extremamente versáteis -, tais como placa universal, placa de castanhas independentes, luneta fixa e luneta acompanhadora, aparelho conificador, pinças etc (CHIAVERINI, 1986).

Conforme Chiaverini (1986), a figura 5 apresenta esquematicamente as principais operações de torneamento.

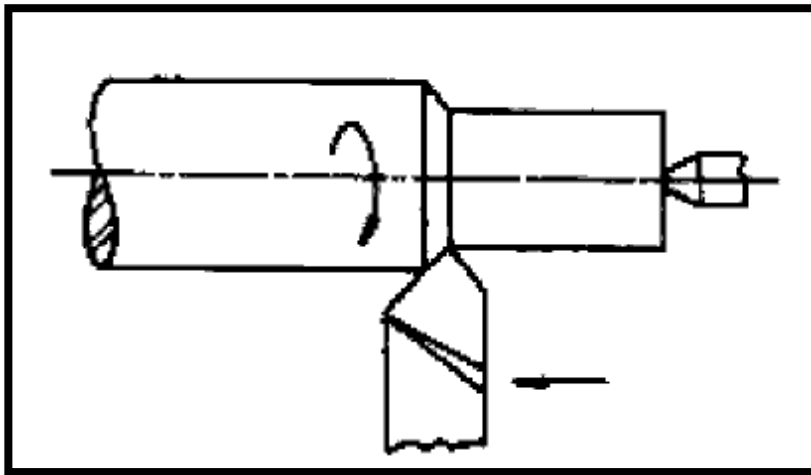
Figura 7 – Principais operações de torneamento.



Fonte: CHIAVERINE (1986).

O torneamento utilizado no presente trabalho será o torneamento cilíndrico externo, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina, conforme pode observar na figura 6, torneamento cilíndrico externo.

Figura 8 – Torneamento cilíndrico externo.



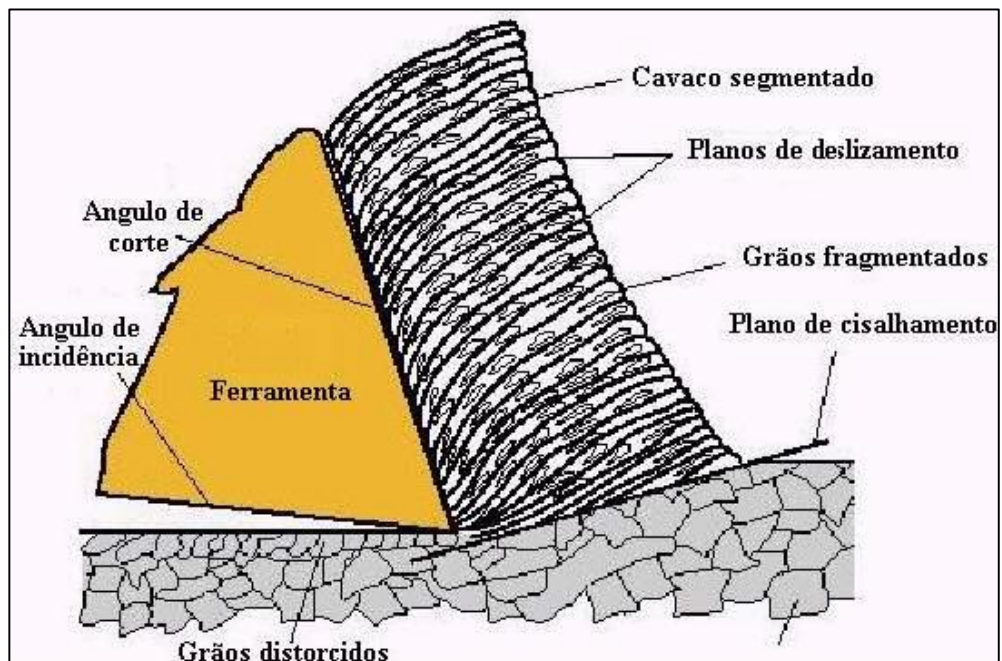
Fonte: Ferraresi, 1970.

9. MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACO

Ferraresi (1977), já definia com muita clareza que o cavaco representa uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, em operação de usinagem, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

O cavaco em geral pode ser formado por um mecanismo de deformação plástica, onde os cristais do metal são alongados através de escorregamento ou cisalhamento, figura 7.

Figura 9 - Distribuição do material da peça durante a formação do cavaco.



Fonte: Diniz, 1999

A formação de cavaco pode revelar diversos fatores ligados à usinagem dos materiais, tais como desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte, etc. Assim, estão envolvidos no processo de formação de cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, a segurança do operador, a utilização adequada da máquina-ferramenta, etc (Diniz et al., 1999).

O corte dos metais, pode envolver o cisalhamento concentrado ao longo de um plano chamado de plano de cisalhamento (zona primária de cisalhamento). O ângulo entre o plano de cisalhamento e a direção de corte é chamado de ângulo de cisalhamento (ϕ). Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores são os esforços de

corde. Esta influência é marcante na usinagem de materiais de alta deformação, como o alumínio. (Diniz et al., 1999)

Na maioria dos casos, a formação de cavaco, pode ocorrer da seguinte forma (Figura 7).

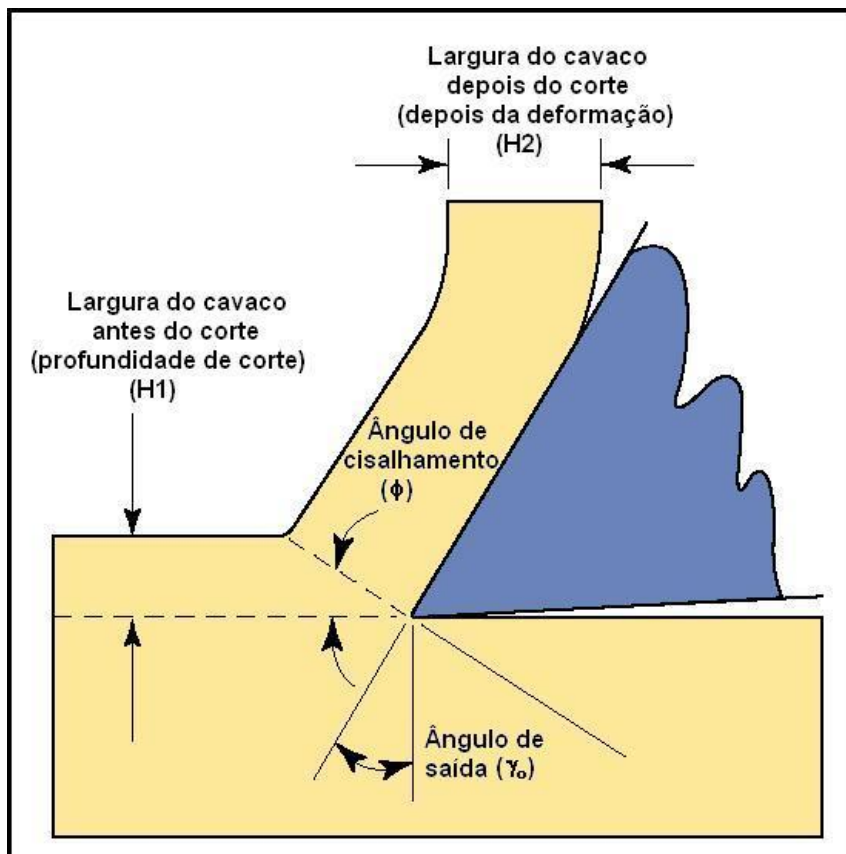
a) No início, o material devido ao avanço da ferramenta contra a peça forma um plano de deslizamento de sentido contrário. Devido à penetração, uma pequena porção de material (ainda solidária à peça) é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.

b) O material recalcado sofre uma deformação plástica instantânea, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento sob o plano de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada (sem que haja com isso uma perda de coesão) entre a porção de material recalcado e a peça. Durante a usinagem, os planos instantâneos irão definir uma certa região entre a peça e o cavaco, dita região de cisalhamento.

c) Continuando o avanço da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento. Esse fato pode estar relacionado aos defeitos lineares dos materiais e as condições de usinagem, visto que alguns materiais que apresentam resistência ao movimento das discordâncias podem apresentar baixas taxas de encruamento provocando assim essas rupturas.

d) Com o movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma outra porção desse material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno. Esse fenômeno pode ser mais bem observado em cavacos de morfologia segmentada, traduzida pelas separações de suas porções.

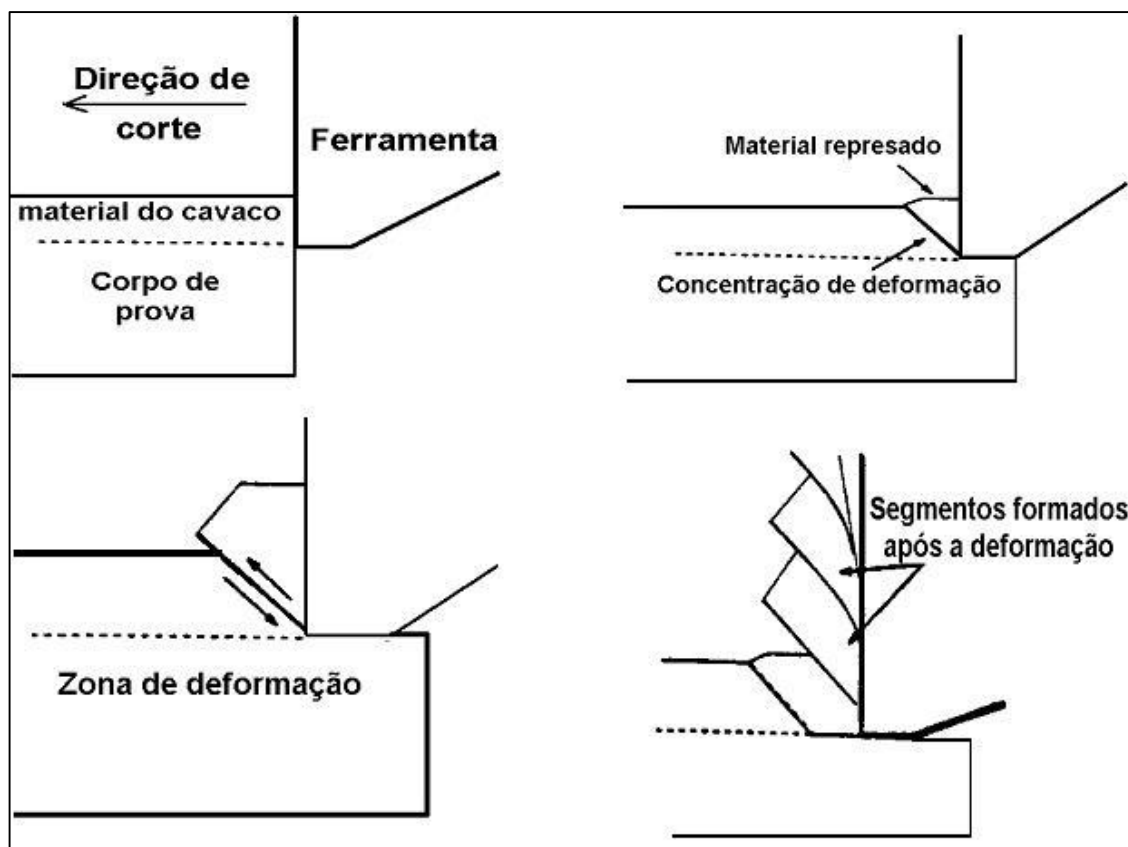
Figura 10 - Esquema da formação do cavaco mostrando o plano de cisalhamento



Fonte: Schneider, 2001.

A seqüência do processo de formação do cavaco pode ser observada através da Figura 9. Esse esquema não pode ser totalmente representativo para todos materiais, porém pode ser considerada uma forma generalizada e comparativa. (Schneider, 2001.)

Figura 11 - Representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco



Fonte: Siemers et al., 2001.

Do exposto conclui-se que, o fenômeno da formação do cavaco obedecendo às propriedades mecânicas de cada material pode ser considerado um fenômeno periódico. Tem-se em geral, alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido. (Siemers et al., 2001)

9.1. Tipos de Cavacos

Os cavacos podem ser classificados de diversas maneiras. Existem maneiras detalhadas de se classificar os tipos e formas dos cavacos, como por exemplo, a classificação que a norma ISO 3685 apresenta. Uma maneira didática de se classificar os cavacos seria pela classificação em tipos e formas. (Schneider, 2001.)

Com relação aos tipos de cavacos podemos classificá-los conforme aos seus resultados, ou seja, a interação entre suas propriedades mecânicas e a operação de corte:

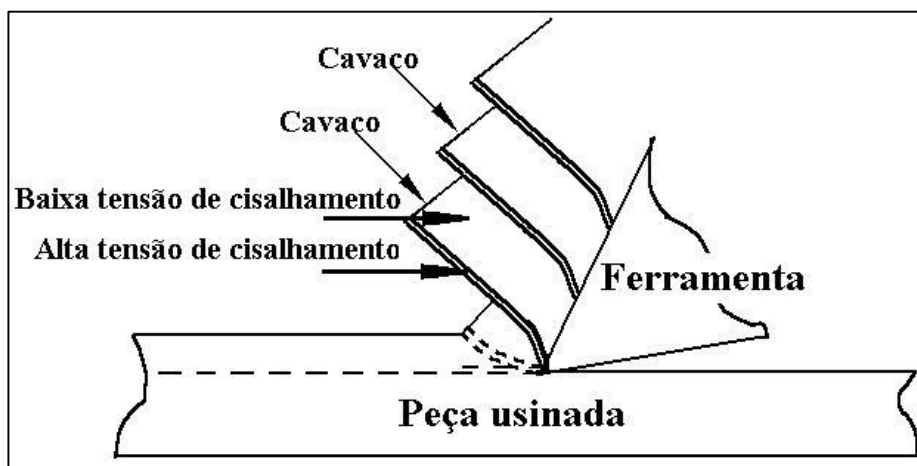
- Cavaco contínuo;
- Cavaco de cisalhamento;
- Cavaco de ruptura.

O cavaco contínuo apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. No cavaco contínuo, a distinção entre estes grupos lamelares não é tão nítida, como nos outros tipos de cavaco; há apenas um deslizamento destes elementos de cavacos. Este deslizamento é, porém, nitidamente observado através da variação da força de usinagem. O cavaco contínuo forma-se na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, onde o ângulo de saída da ferramenta deve assumir valores elevados. (Schneider, 2001.)

O cavaco de cisalhamento apresenta-se constituído de grupos lamelares bem distintos e justapostos o que dá ao material um formato de dente de serra, aspecto que confere um certo grau de segmentação ao cavaco. Forma-se quando houver diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, a heterogeneidades da estrutura metalográfica, ou a vibrações externas que conduzem às variações da espessura de cavaco. Já os Cavacos de ruptura apresentam-se constituídos de fragmentos arrancados da peça usinada. Há uma ruptura completa do material em grupos lamelares (na região de cisalhamento), os quais permanecem separados. Forma-se na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura

heterogênea, tais como ferro fundido ou latão. Através da figura 10 pode-se observar a formação das zonas de cisalhamento. (Schneider, 2001.)

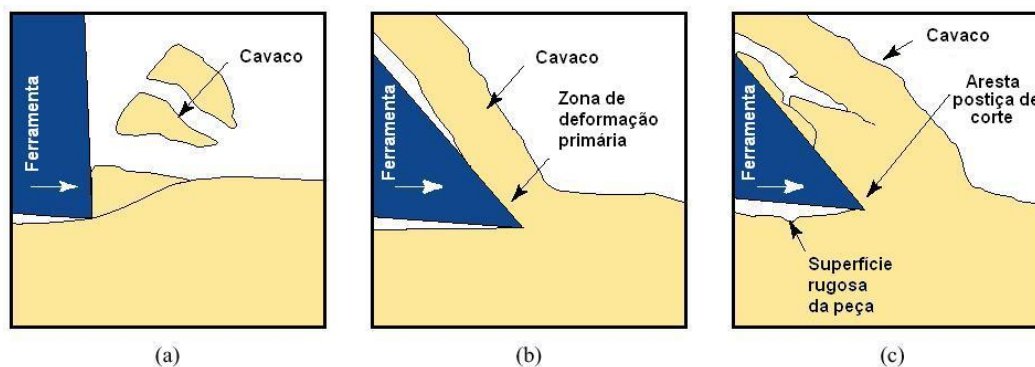
Figura 12 - Formação das zonas de cisalhamento



Fonte: Schneider, 2001.

Através da figura 11 também pode-se observar alguns tipos de cavacos formados na usinagem.

Figura 13 - Tipos de cavacos de usinagem: a) Descontínuo (de ruptura); b) Contínuo; c) Contínuo com aresta postiça de corte



Fonte: Schneider, 2001.

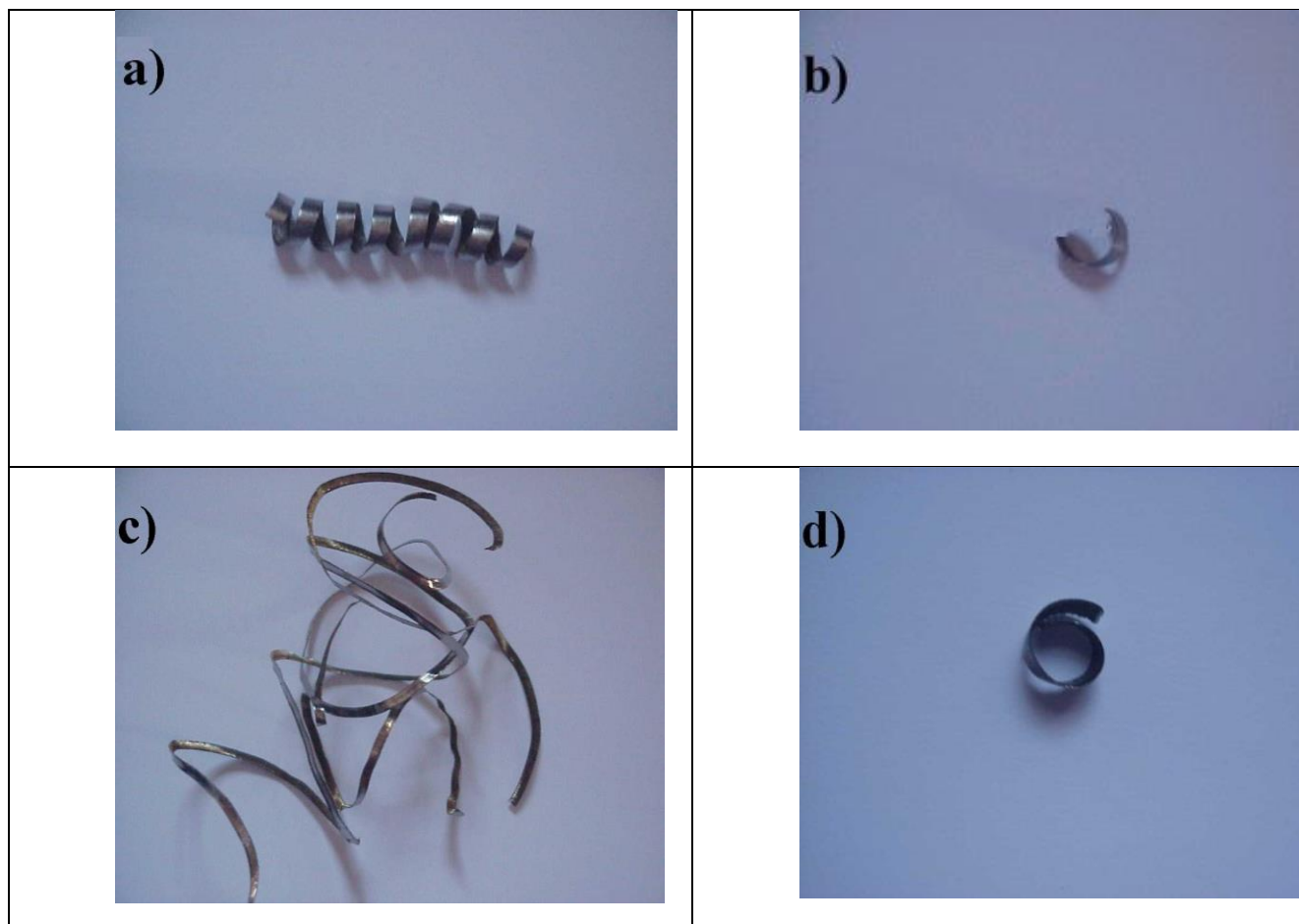
Não há uma distinção muito nítida entre os cavacos contínuos e de cisalhamento. Conforme as condições de usinagem e a geometria da ferramenta, se estas impuserem uma deformação maior ao cavaco, pode-se passar do contínuo ao de cisalhamento, mas o principal fator determinante do

tipo de cavaco é o material da peça usinada. Em geral materiais dúcteis (aços, alumínio) formam cavacos contínuos ou de cisalhamento e materiais frágeis (ferros fundidos) formam cavacos de ruptura. (Schneider, 2001.)

Além dos três tipos de cavaco, pode-se diferenciá-los quanto à sua forma. Quatro tipos de formas de cavacos podem ser considerados, conforme podemos observar através da Figura 12:

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

Figura 14 - Formas de cavaco: a) helicoidal, b) lascas, c) fita, d) espiral

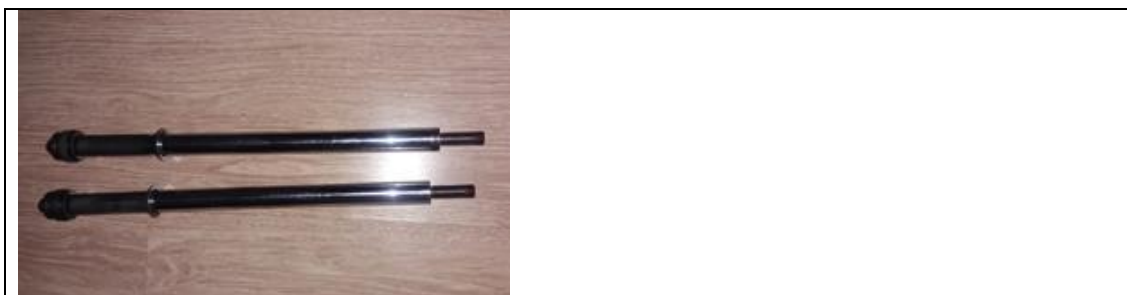


Fonte: Moreira, 2002.

10. MATERIAIS E MÉTODOS

Este processo de soldagem está despertando grande interesse na indústria e pesquisa. O processo de soldagem por fricção do referente trabalho busca diminuir os efeitos de uma das principais preocupações dos processos de soldagem, a zona termicamente afetada. A ideia do trabalho ajuda a enriquecer esse processo, foi desenvolvido então a soldagem por fricção radial em uma haste de amortecedor de carro. A haste de é um dos principais componentes do sistema de amortecimento dos veículos automotivos. A haste utilizada no processo de soldagem se trata de um componente já utilizado, a quilometragem do sistema atingiu 80 quilômetros. Sistema foi desmontado para que fosse utilizada somente estes componentes. Assim foram obtidos duas amostras de um automóvel. A imagem da figura 1 representa as hastes de amortecedor.

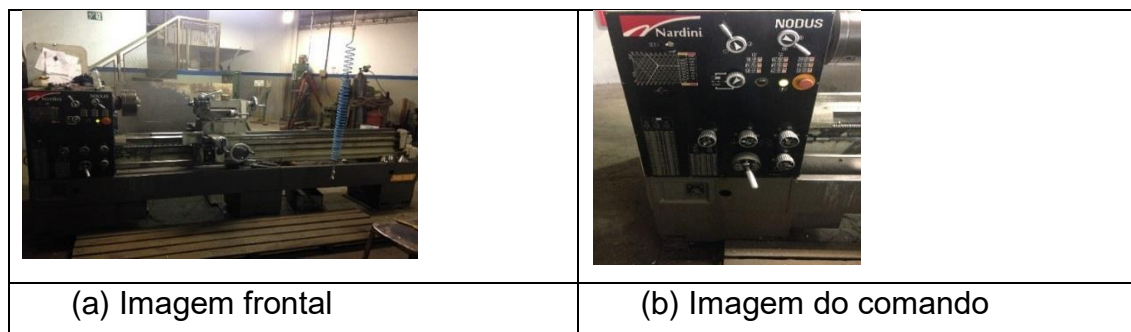
Figura 15 - Imagem das hastes amortecedor com 80 quilômetros.



Fonte: próprio autor.

A máquina utilizada para os ensaios foi o torno NARDINI NODUS representado pelas imagens da figura 2. A composição química nas hastes foram obtidas para tentar equivaler a discussão perante a semelhança das hastes, pois a haste nova era de um carro da Fiat e as outras duas da GM (General Motors).

Figura 16 - Imagens da máquina utilizada para o processo de fricção.



Fonte: Próprio autor.

Com relação ao processo de soldagem por fricção tomou-se o cuidado primeiramente com a limpeza nos corpos de prova removeu-se tais produtos como óleo, graxa ou qualquer componente que pudesse diminuir o atrito entre as partes na hora da soldagem. Os corpos de provas para o processo de soldagem foram fixados no torno, onde um deles na placa para o movimento giratório e a outra peça no contra-ponto, considerando como a parte não giratória ou fixa tendo apenas o movimento na horizontal.

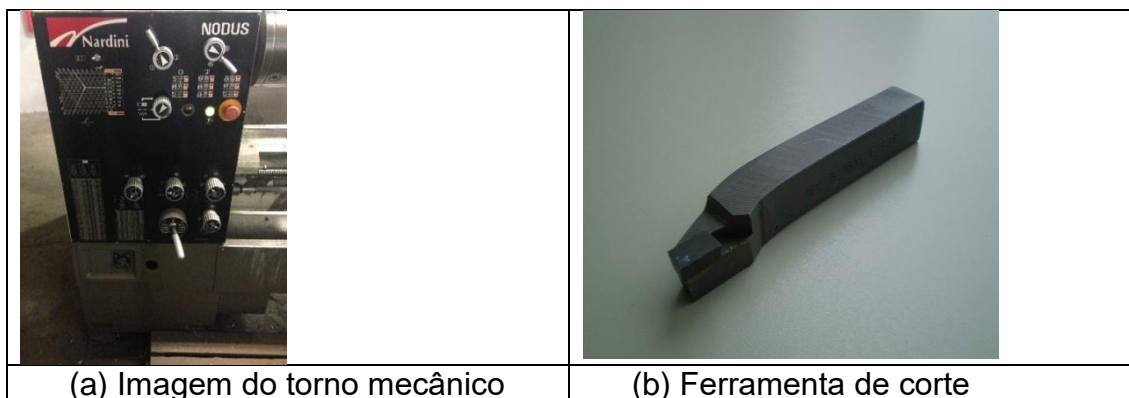
O alinhamento dos CP's entre si é muito importante, pois evita uma soldagem desalinhada e o excesso de vibração, algo que pode dificultar no momento da soldagem e por consequência não obter uma solda de qualidade. Foi utilizada uma rotação de 700 rpm para realizar a soldagem que durou aproximadamente 2 minutos no total, os primeiros 20 segundos foi observado o tempo de atrito, momento em que os dois materiais estavam em contato e os 2 minutos e 30 segundos restantes foi o momento de pressão por forjamento, momento este em que o torno já se encontrava desligado e os materiais em linha de forjamento, isto é necessário até que a região da solda se esfriasse.

Foi proposto no trabalho que ao seccionar as amostras em questão uma seria usinada para análises dos cavacos e outra seria analisada por meio da região cementada da haste, pois essa região cementada contemplaria na formação da "aba" e o efeito na formação dessa região seria de forma peculiar perante outros processos de soldagem por fricção. Para ajudar no entendimento de todo o proposto foi realizado os ensaios metalográfico e de dureza das

regiões de solda e metal de base. A dureza utilizada foi a de Rockwell A, com penetrador de diamante cônico 120° , 60 kgf de carga e 10 kgf de pré-carga, o durômetro utilizado foi o da Fatec/Pinda. Para ajudar no entendimento foi analisado outras haste com a finalidade ajudar na discussão dos resultados, tal como uma haste zero quilômetro.

A ferramenta utilizada para o processo de torneamento foi uma ferramenta de corte de metal duro imagem (b) da figura 3, também pode ser observado por meio da imagem (a) os parâmetros do torno convencional para a usinagem.

Figura 17- Imagens do torno e Ferramenta Faca utilizada no torneamento.



Fonte: Próprio autor

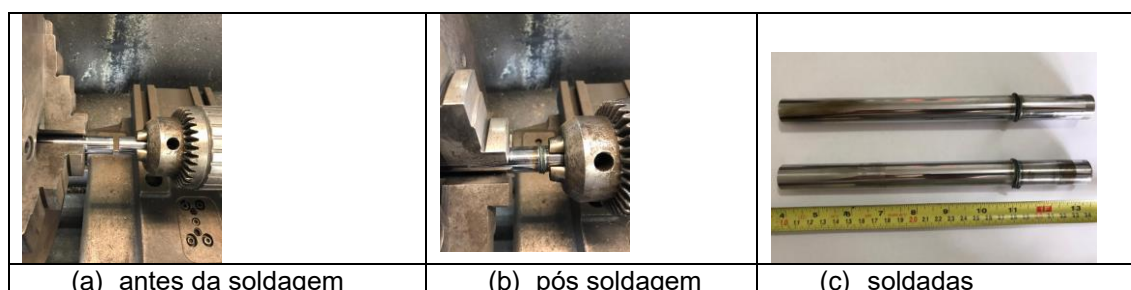
Com relação aos parâmetros utilizados nos processo de usinagem, foi baseado em catálogos que exprimem usinagem de ligas ferrosas, a rotação foi de 810 RPM, a velocidade de corte de 90 (m/min), o avanço de 0,25 (mm/volta), a profundidade de usinagem de 1,5 m.

11. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho pode colaborar além da soldagem por fricção na união da usinagem como certificador de processo de soldagem, visto que conforme o cavaco vai sendo subtraído vai levando informações de todo histórico dos processos de fabricação, tais como, fundição, conformação mecânica, tratamentos térmicos e termoquímicos além da soldagem. Então vincular a usinagem pode ser um aliado nos processos de certificação de soldagem.

O cavaco é uma parte do material que se desprende pela ação tribológica da ferramenta, peça e forças físicas. Então seu comportamento durante o processo de usinagem pode confirmar as possíveis mudanças das propriedades dos metais tal como a dureza na soldagem, já que esse processo pode apresentar, o metal de base, zona de transição e zona fundida. Além disso, pode-se somar mudanças de caráter físico como dilatação térmica, mudanças metalúrgicas como fases, defeitos a níveis atômicos e descontinuidades. A soldagem por fricção pode ajudar a diminuir todos estes efeitos por isso o interesse em procurar novos processo e autenticidade nas certificações nos processos de soldagem. As imagens da figura 1 representam a sequência da soldagem das haste de amortecedor do aço 1045 soldado por fricção. Pode-se observar a formação das “abas”, característica dos processo de soldagem por fricção. As duas hastes foram soldadas com os mesmos parâmetros para os efetivos estudos.

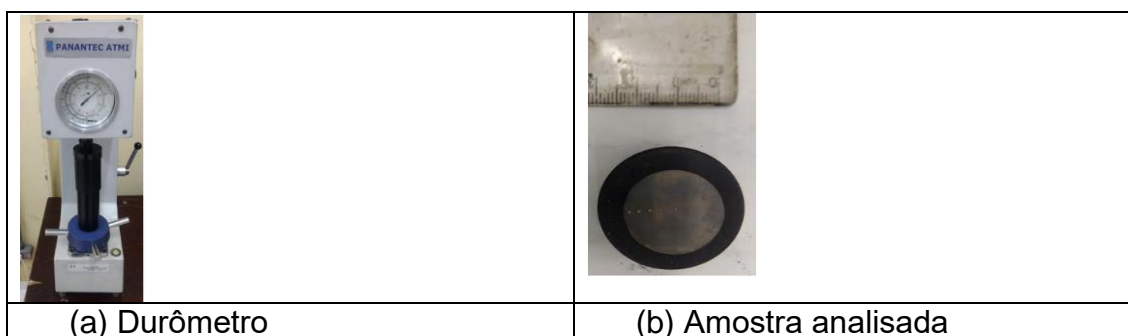
Figura 18 – Sequências da soldagem das hastes soldadas pelo processo de fricção radial.



Fonte: próprio autor.

Como proposto no trabalho foram medidas a dureza das amostras, as imagens a seguir foram da medida da amostra sem usinar, em que o objetivo foi analisar a dureza do centro da peça até a região da “aba”. Pode ser visualizada por meio da figura 2 as imagens tanto do durômetro quanto da amostra analisada.

Figura 19 – Imagens (a) durômetro da Fatec/Pinda e da amostra analisada (b).



Fonte: próprio autor

Tabela 1 – Resultados de dureza da amostra não usinada.

Posição	1	2	3	4	5	6
Dureza HRA	56	59	60	60	60	60
Dureza HB	381	421	432	432	432	432

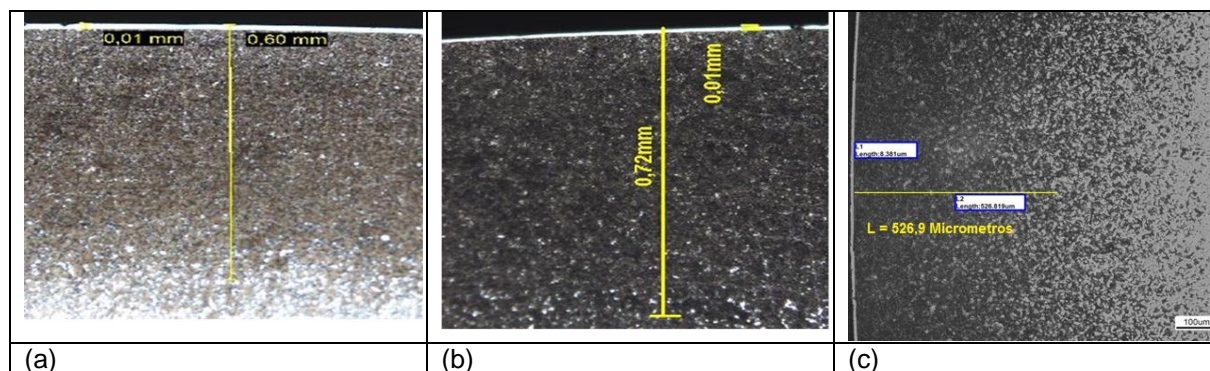
Fonte: próprio autor.

Pode ser observado que as medidas próximas a região cementada teve um aumento de dureza, porém cabe ressaltar que a camada cementada é muito pequena. A média de dureza da camada cementada foi de 61 Rockwell para a haste nova, esses valores não são revelados pelos fabricantes. Em termos de medidas em Brinell a média da região não cementada ficou em torno de 240 HB e na camada cementada ficou em torno de 470 HB, ou seja, avaliou-se as hastes não soldadas.

Contudo pode ser discutido que a medida de dureza ficou abaixo do esperado da região da “aba”, porém ao logo da seção radial ficou acima de uma haste nova, podendo concluir que deve haver uma dissipação do carbono ao longo da face radial da haste, já que a camada cementada é rica em carbeto pelo processo de cementação, apesar da camada ser muito pequena como

prova uma amostra nova, ou seja de zero quilômetro, como pode ser observado por meio da figura 3. As imagens da figura a seguir revela as microestruturas das haste novas e usadas. A primeira imagem representa a haste de 80000, a segunda de zero quilômetro e a terceira de 110000 quilômetros.

Figura 20 – Imagens metalográficas com as medidas das camadas temperadas.



Fonte: o autor.

A Tabela 2 revela os valores da composição química dos componentes do trabalho, o corpo de prova 1 representa a haste nova, a amostra 2 representa a amostra 80000 km e a amostra 03 com 110000 km rodados. Pode ser observado que quase não houvera mudanças de composição química de uma haste para outra. Apesar de ser um aço carbono 1045, ele demonstra valores de alguns outros elementos que até se comportar como uma aço ARBL (alta resistência e baixa liga). Elementos tais como o cromo ajudam no processo de têmpera, o manganês ajuda no endurecimento do material conforme ele vai sendo estimulado por cargas, tal como uma roda de trem ou trilhos. O cobre ajuda a melhorar a resistência à corrosão, outros elementos tais como o fósforo e enxofre são controlados no seu processo de fabricação.

Tabela 2 – Composição químicas das amostras das haste.

SAE	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr
1045								
cdp 1	0,485	0,55	0,0034	0,014	0,274	0,173	0,076	0,122
cdp 2	0,471	0,55	0,0025	0,013	0,275	0,174	0,076	0,123
Cdp 3	0,446	0,55	0,0032	0,015	0,275	0,181	0,079	0,124

Fonte: o autor.

Por meio da tabela 03 pode ser observado as medidas de dureza do corpo de prova usinado, foi analisado a posição horizontal para verificar as possíveis mudanças na região de solda.

Tabela 3 – Resultados de dureza da amostra usinada.

Posição	1	2	3	4	5	6
Dureza HRA	59	59	58	62	58	57
Dureza HB	421	421	411	469	411	400

Fonte: próprio autor.

A medida da posição 4 corresponde a região dentro da solda, conforme observado na amostra analisada com a “aba” a região da solda foi a que mais apresentou aumento da dureza perante ao metal de base, esse aumento foi em torno de 13% do metal de base. Essa elevação da dureza já era esperado pois se trata de um processo por fricção e pressão ao mesmo tempo. Sendo rápido o processo de soldagem por fricção ele não necessita de um aumento grande de temperatura, na maioria dos processo de soldagem por fricção radial diminui-se em torno de 75% da temperatura necessária para fundir um material, isto é devido ao alto atrito combinado a pressão exercida. Porém a compressão pode ajudar no processo de encruamento da zona fundida.

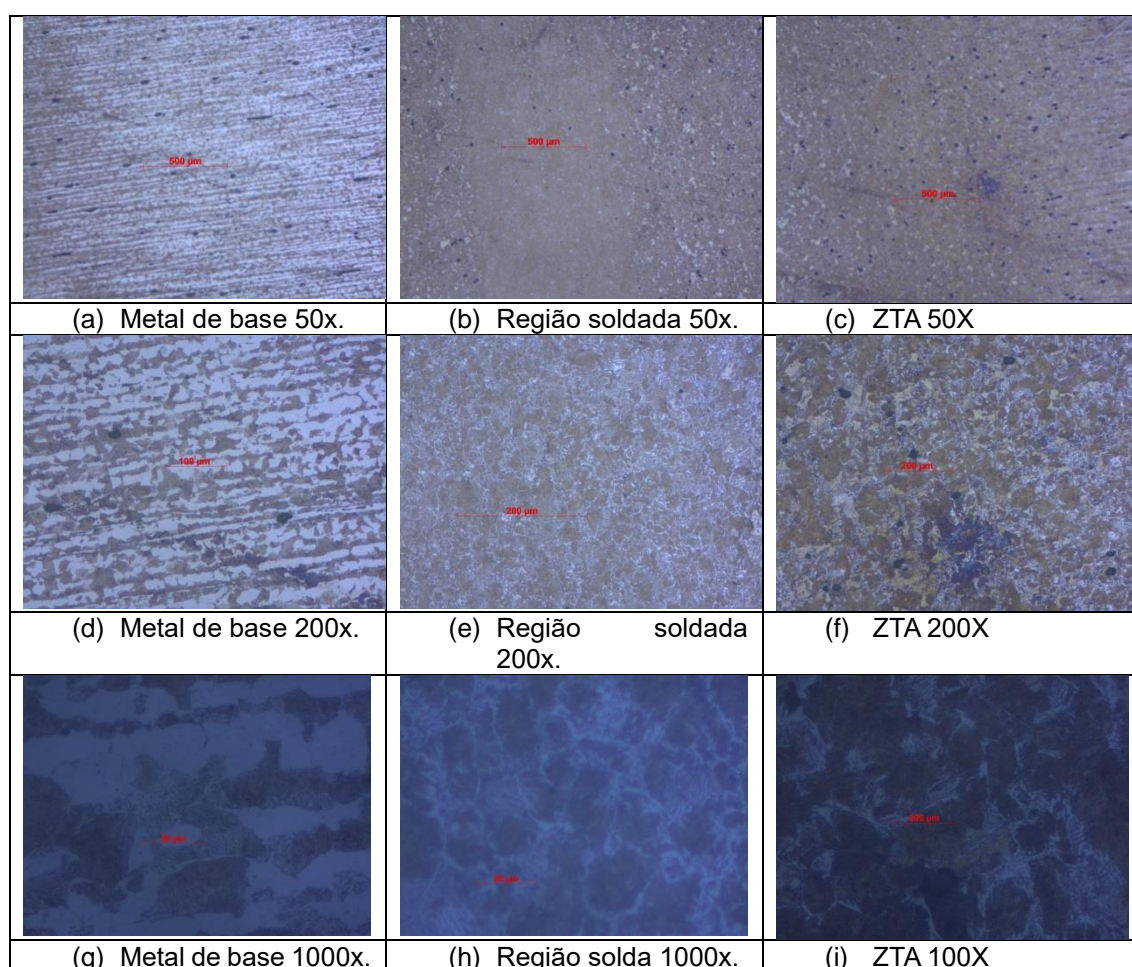
Como já descrito anteriormente que a haste de amortecedor de carros possui uma camada temperada que na maioria das vezes fica mais dura em torno 57% maior que o centro da haste, obedecendo o limite crítico de têmpera que abaixo desse valor não pode ser considerado um material temperado.

Assim pode ser concluído que apesar de endurecer totalmente a região soldada não chega a comprometer nesta questão. Porém cabe ressaltar que

para a funcionalidade da haste a dureza deve ser diferenciada, ou seja, a superfície deve ser mais dura que a região central, isto de certo modo foi comprometido pelas medidas de dureza realizadas.

A imagens a seguir representam as micrografias da amostra usinada para discussão dos resultados. As amostras são das regiões de solda, zona termicamente afetada e região do metal e base. As posições analisadas foram na região central pois podem ser representativas já que se trata de uma soldagem em que as superfícies se encontram de forma paralela e acredita-se que toda esteja atritando de forma homogênea.

Figura 21 – Imagens da amostra usinada, nital 2%.



Fonte: próprio autor.

As imagens (a) (d) e (g) da figura 4 mostram o metal de base, pode então ser visualizado uma estrutura perlítica típica de um aço 1045. Pode ser visualizado na figura (g) a orientação dos grãos, este fato está ligado ao processo

de trefilação, são observados também precipitados escuros idiomórficos talvez proveniente da composição, como discutido anteriormente, este aço possui frações de cromo e cobre, não foi possível fazer uma análise destes precipitados.

As imagens (b), (e) e (h) da figura 4 são da região soldada ou zona fundida, pode ser observar a diferença perante o considerado “metal de base”, pois é tratado aqui apenas como referência pois o processo por fricção é considerado como autógeno. A imagem (e) e (h) revela uma estrutura parecida de um aço normalizado, onde a ferrita circunda a perlita. Isto se deve ao processo de resfriamento da solidificação do material, onde os grãos especificamente tentam se organizar de forma circular, pois neste caso devido a temperatura não atingir valores altos e pelo diâmetro pequeno da peça o resfriamento é mais rápido do que um processo de fusão normal em que normalmente apresenta grãos colunares ou dendríticos. Este fato demonstra um ponto positivo para a soldagem por fricção radial, não havendo a necessidade de tratamentos térmicos posteriores como alívio de tensão ou recozimento propriamente dito.

Quanto aos precipitados apresentados no metal de base, praticamente não foram observados, isto pode ter ocorrido pelo fato do próprio estado líquido em transformação rápida para o estado sólido não ter dado tempo de se precipitar, em processos normais de solidificação em que é mais lenta e por conta do calor latente de solidificação o coeficiente de solubilidade vai diminuindo, assim os componentes que se forem ligando são forçados a se juntarem e precipitar na matriz.

As imagens (c), (f) e (i), constituem a região de transição ou podendo ainda se chamar de zona termicamente afetada. A imagens (c) e (f) pode ser observado uma maior concentração dos precipitados, isto pode ter uma relação com a zona fundida, pois aqueles precipitados que não se fundiram ou aqueles que começaram a ser formar foram “expulsos” dessa região, demonstrando a maior concentração. Isto pode implicar em mudanças nas propriedades mecânicas do material, por exemplo, aumento da dureza e aumento da resistência, também pode alterar alguns parâmetros físicos como a dilatação térmica que neste caso, pode levar à mudanças estruturais em aplicação já que

esse componente entra aquecimento perante o óleo do amortecedor ou ainda em qualquer utilização em que envolva aquecimento.

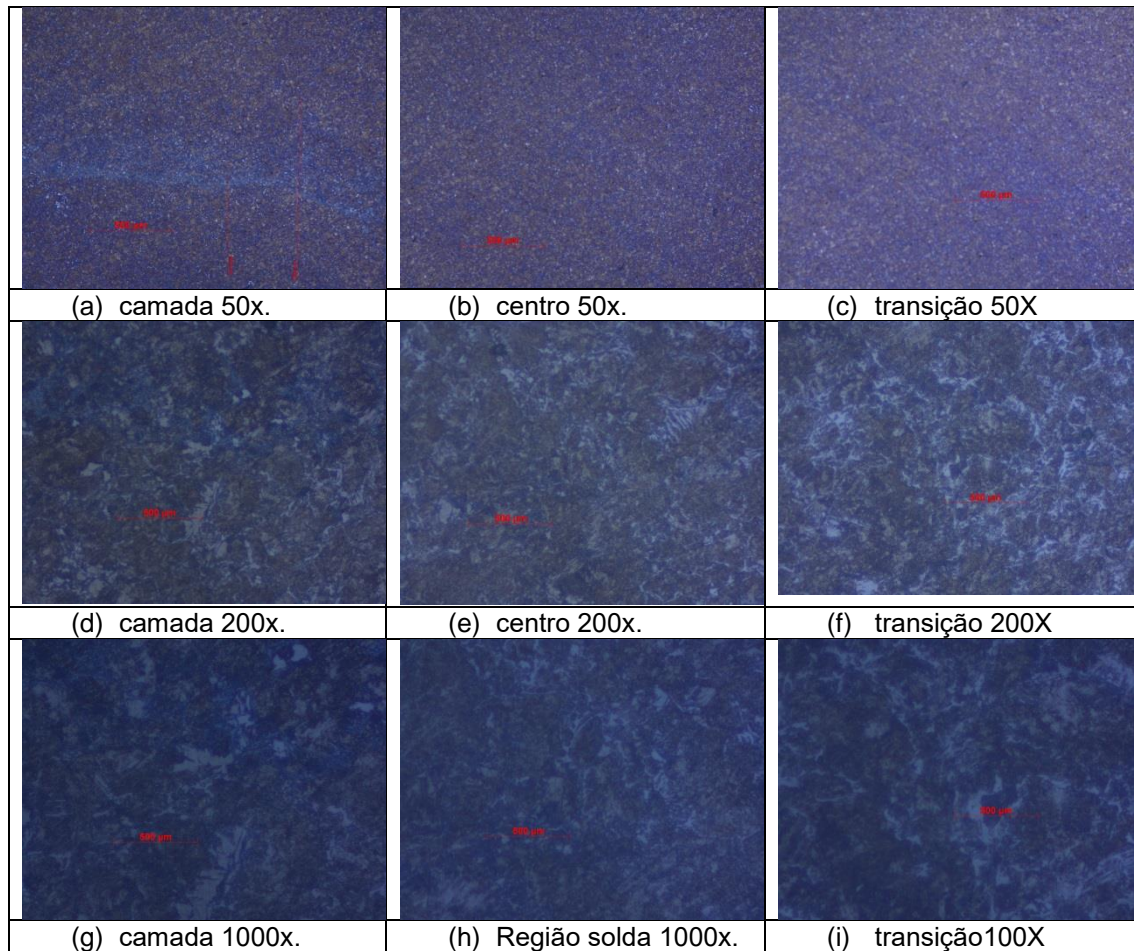
Na imagem da figura (c) mostra o encontro das regiões orientada pela trefilação ou ainda do “metal de base” e da zona fundida, essa região foi medida e o valor aproximado chegou a 1,8mm em média expansão e 0,5 mm de região bem definida visualmente. No entanto, apesar de apresentar uma ZTA, sua região extensa se comparada a outros processos como a soldagem por fusão quase não representa uma ZTA definitivamente.

As imagens da figura 5 representam a amostra não usinada, onde (a) (d) e (g) são imagens da camada que possivelmente se tornou a “aba” geométrica da finalização do processo de soldagem. Essa “aba” constituiu basicamente da camada temperada do processo de fabricação das hastes de amortecedores automotivos. Por meio da imagem (a) pode ser observado uma linha de demarcada no centro da imagem, talvez possa representar uma demarcação separando a região cementada da região não cementada, a região acima da linha pode ser observado uma morfologia um pouco diferente, a região cementada tem concentração maior de carbono logo a quantidade de cementita é maior logo aumentando a porção de grãos perlíticos. As imagens (d) e (g) são ampliações da região acima da linha, pode ser visualizado regiões perlíticas geometricamente não uniformes, ou seja, uma variedade grande geometricamente da morfologia destas perlitas. Cabe ressaltar também nestas imagens pequenas frações de grãos colunares em forma de bastonetes que podem ser de carbeto de ferro ou cementita Widmanstätten. Toda essa morfologia pode tornar esse material mais duro e resistente.

As imagens (b) (e) e (h), representam a região do centro do corpo de prova. Pode ser observado que não houve mudança significativa das fases, pode ser observado na imagem (h) com maior ampliação a presença frações de perlita idiomórfica e também regiões geometricamente aleatória em sua geometria, isto pode ter uma explicação, pois o processo de fricção radial faz com a anisotropia tome caminhos diferentes, já que a chegada dos grãos alinhados conforme a trefilação na amostra teriam em processo visual na metalografia normal sem a soldagem ficariam praticamente idiomórficos, porém com o processo de giro provocado pela máquina podem distorcer os grãos conforme são forçados uma

face contra a outra num arraste circular. Essa deformação instantânea pode alterar a morfologia das fases onde os grãos se apresentam, esse processo é provocado pelo atrito e pressão onde podem levar à formas aleatórias geométricas das fase e grãos.

Figura 22 – Imagens da amostra não usinada, nital 2%.



Fonte: próprio autor.

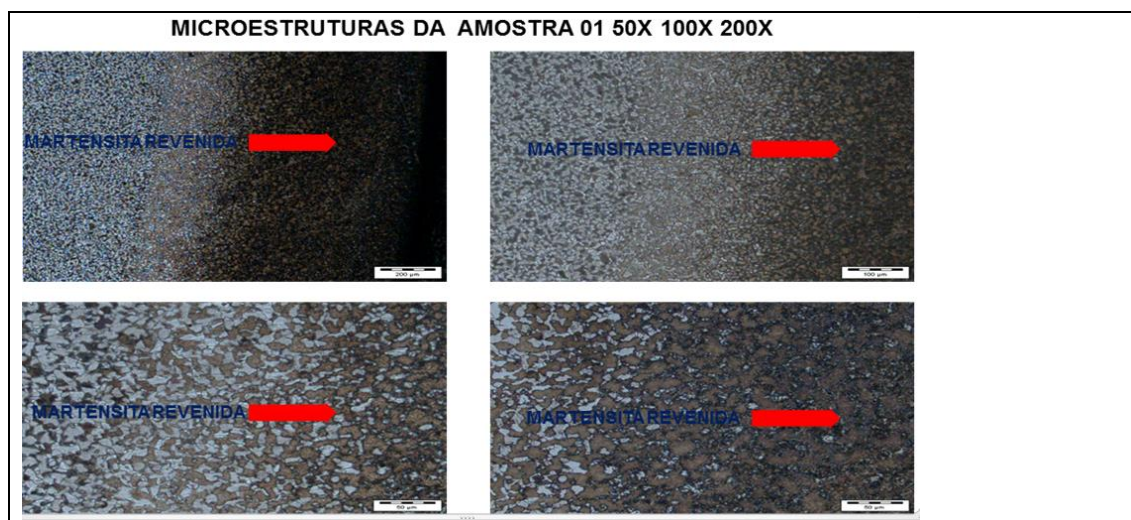
No entanto, este fato não foi tão evidenciado na região central quando comparado a outras regiões analisadas, isto pode se explicado pelas tensões radiais provocadas pelo processo de soldagem radial, pois essas tensões circulares são menos intensas no centro, porém a medida que se afasta do centro e distancia no raio para a superfície elas ficam mais atuantes no arraste circular, isto pode ser comparado a uma figura em espiral onde o raio de curvatura vai aumentando e o espaço para os grãos ser arrastados no comprimento das linhas giratória também vão aumentando, fazendo com que se

deforme por estiramento ou cisalhamento culminando em formas mais aleatórias dos grãos e fase como pode ser observados nas imagens analisadas.

Com relação as imagens (c), (f) e (l), representam a zona de transição ou a região próxima da “aba” e do centro, pois esta amostra fora analisada na face radial para melhor entender o efeito da camada. Por meio da imagem (f) e (i) pode ser visualizado algumas regiões onde os grãos estão direcionado em forma de círculos, mostrando o arraste destes pelo processo de fricção radial. A morfologia também se apresentou de forma heterogenia que ficou caracterizado toda essa discussão junto a região de soldagem. Foi possível visualizar também pequenos grãos de perlita idiomórfica com a maior ampliação, ou seja, a imagem (i). Uma outra observação foi a diferença visual no tamanhos das fases da região cementada, intermediária e central, os grãos da região central ficaram menores do que a região intermediária e conseqüentemente esta maior do que a região “aba”, este fator pode ter ajudado nas diferenças de dureza destas regiões.

As imagens da figura 6 pode ajudar a explicar as diferenças das mudanças provocadas pelo processo de soldagem por fricção radial nas fases e na camada cementada.

Figura 23 – Imagens de haste zero quilômetro.

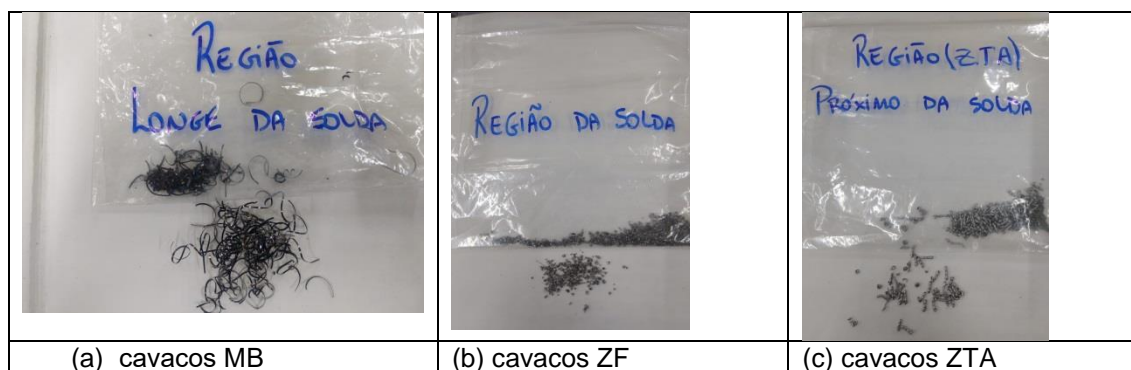


Fonte: o autor

A partir da terceira imagem pode-se observar as mudanças da perlita fina para uma perlita grosseira e martensita revenida proveniente do processo de cementação. Comparando as amostras soldadas essa definição visual ficou diferente pois pode ter ocorrido que carbono da região temperada deva ter difundido para dentro centro da haste e fazendo aumentar a quantidade de perlita, conseqüentemente a dureza ficou de certo modo mais próxima entre as regiões analisadas.

As imagens da figura 7 revelam os cavacos gerados pelo processo de torneamento da amostra soldada pelo processo de fricção radial e da região não soldada. A amostra (a) são cavacos do “metal de base”, a imagem (b) são da região fundida, ou seja, na “aba”, a imagem (c) representa o cavaco da região próxima a solda.

Figura 24 – Cavacos do processo de torneamento do aço cementado 1045.



Fonte: próprio autor.

O objetivo de obter esses cavacos de cada região foi de usá-los para avaliar suas mudanças perante a solda. Não foi o objetivo de avaliar o processo de usinagem, ou seja, a busca por melhores condições de corte, escolha da melhor ferramenta, tempo de vida de ferramenta e usinabilidade, neste sentido a imagem (a) dos cavacos já estariam sob mudanças na usinagem, pois se trata de cavacos tipo fita, que sempre indesejável nos processos de usinagem. Porém, os outros tipos seriam mais apropriados pois se tratam de cavacos em pedaços imagem (b) e cavacos helicoidais imagem (c). Portanto, nem as formas e nem os tipos de cavacos serão utilizados para análise, pois a busca pela certificação passa pela semelhança, ou seja, se os cavacos se demonstrarem em todas as regiões semelhantes, deduz-se que a dureza, composição, a morfologia das fases estão distribuídos de forma homogênea e semelhantes. Assim pode-se observar nas amostras de cavacos recolhidas que houve uma mudança sensível da região do metal de base para a zona fundida. Guardada todas as condições de corte para toda a seção, velocidade de corte, avanço, rotação, profundidade de usinagem, no “metal de base” apresentou cavacos do tipo fita, que é típico de materiais dúcteis, na região da solda apresentou cavacos do tipo e frágeis e quebradiços típicos de materiais frágeis e mais resistentes, os cavacos da região de transição são do tipo cisalhantes e em forma helicoidal típicos de materiais com dureza intermediária.

Toda essa análise seria muito aplicada a soldagem por fusão, tais como, TIG, MIG/MAG ou eletrodo revestido, que são depósitos de matéria que quase sempre são diferentes do metal de base, fazendo mudar a essência do metal de base, ou seja, nos fenômenos físicos, químicos e metalúrgico, logo se for avaliar pela usinagem pode com certeza apresentar mudanças acentuadas dos

cavacos. Porém, com relação aos processos de soldagem por fricção que se caracteriza-se como autógeno espera-se poucas mudanças na região soldada são esperadas, chegando a casos atenuados da zona termicamente afetada.

No presente trabalho, houve essas mudanças nos cavacos e de forma relevante podendo crer que precisa-se de mais análises, estudos na forma de soldar pode buscar a semelhanças dos cavacos e ajudando a certificar de forma mais barata e prática a soldagem, pois para a certificação atual depende tempo, dinheiro, equipamento e testes laboratoriais, o cavaco já um resultado do processo de fabricação, isto é, dependente de um acabamento final onde se utiliza-se da usinagem.

12. CONCLUSÃO

O presente trabalho, pode trazer uma contribuição para união dos processos de soldagem com a usinagem por meio das análises de cavacos, pois sendo os cavacos o resultado de um processo de usinagem em que dependendo das propriedades mecânicas dos materiais esses cavacos podem mudar tanto na forma quanto no tipo, os processos de soldagem em sua maioria possuem metal de base, zona termicamente afetada e zona fundida, que na maioria das vezes ficam diferentes por meio nas propriedades, físicas, mecânica e metalúrgicas, neste caso pode também podem acarretar mudanças na usinagem reveladas por meio dos cavacos. Foi observado esta proposta no desenvolvimento do trabalho, os cavacos se mostraram diferentes ao longo da zona fundida, na região de transição e na região não soldada que foi chamado para diferencia de metal de base, apesar ser um processo de soldagem de mesmo material.

Por meio dessa relação poderá no futuro com o avanço das pesquisas desta proposto, visto que se buscar a melhoria dos processos, ou seja, dos parâmetros de solda, a tendência seria também na mudanças da morfologia dos cavacos, então qual seria a melhor situação desta certificação, seria neste que quando os cavacos ficarem semelhantes tanto na forma quanto no tipo o processo de soldagem estaria qualificando como uma solda de qualidade, ou seja, a dureza que um dos parâmetros que mais se preocupa na região soldada estaria também semelhantes para todas a regiões possíveis em qualquer processo de soldagem.

Foi observado no trabalho a mudança nas fases e nos contornos de grão da amostra soldada pelo processo de fricção radial, foi revelado que as fases e grãos não apresentaram formas geométricas bem definidas, ou seja, tanto o tamanho quanto a morfologia ficaram heterogenia, talvez isto tenha a relação com as forças orientadas pela fricção radia em possivelmente foram arrastados ou cisalhados conforme o giro da peças em contatos faciais. Esse componente vetorial de força de arraste provocada pelo atrito deformou os grãos que estavam alinhados pelo processo de conformação mecânica de trefilação, esses grãos sofreram um “redemoinho” espiral no sentido anti-horário. Para que essas

afirmações sejam comprovadas ou para que isso não fique apenas no conceito visual, deve ser proposto para trabalhos futuros o estudo por meio de análise vetorial e índice de “Miller”, alguns programas de análise e processamento de imagens pode auxiliar nestas propostas. Visto, se comprovada a relação destas deformações observadas no processo de fricção sob pressão, isto pode auxiliar em construção de novos parâmetros e equipamentos para soldagem por fricção radial.

Um outra observação obtida neste trabalho que a camada de cementação pode ter influenciado na dureza do material, ou seja, o carbono em excesso deve ter difundido da camada para dentro da peça uma parte para a “aba” durante o processo de soldagem pois a dureza da “aba” ficou um pouco inferior a média de uma camada cementada de um dispositivo de amortecedor.

O presente trabalho pode ainda ser melhorado por meio de pesquisas no futuro, pois dependendo de maior pesquisa, por exemplo, utilizar de microscopia eletrônica de varredura, para verificar a natureza dos precipitados, verificar as orientações das discordâncias, e utilizar de um processado de imagens para assim colaborar com enriquecimento do trabalho e ainda podem ajudar a melhorar os parâmetros de soldagem com objetivo de utilizar os cavacos junta a melhores condições de corte como também um processo de certificação de processos de soldagens.

Pode-se ainda, analisar as fase por medidas de microdureza e levantar dado estatísticos ajudariam a comprovar as mudanças das fases e as diferenças da morfologia na região soldada e na regiões fora da solda onde apresentou uma anisotropia por conta da orientação dos grãos de perlita originária da trefilação.

REFERÊNCIAS

- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- Diniz, A. E., et al. “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”. São Paulo: MM Editora 1999. F. Hasan, A. Jahanafrooz, G. W. Lorimer, and N. Ridley; Metallurgical Transactions A.; v. 13a; August 1982; p. 1337-1345.
- FARIA, P. E.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem por fricção**. Artigo. INFOSOLDA. São Paulo. 2003.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 1970.
- INFOMET. **Ligas de Aço**. Disponível em <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=70> Acesso em 18 set 2019.
- M. Cook, W. P. Fentiman; and E. Davis: J. Inst. M 80, **Metals**; 1952; vol. 80; pp. 419-429.
- OLIVEIRA, Claudia Santos de. **Aço**. Disponível em: <Mecanica.ufes.br/sites/aço1045/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2007-1_claudia_santos_de_oliveira>. Acesso em 11 fev. 2020.
- Schneider, Jr. G., **Cutting tool Applications**, editora Nelson Publishing, Inc., 2001
- Siemers, C., Mukherji, D., Bäker, M., Rösler, J. “Deformation and Microstructure of Titanium Chips and Workpiece”, Z. Metallkd March/2001.
- SILVA, F. L.; GIMENEZ, L. J. **Soldagem por fricção**. Artigo. INFOSOLDA. São Paulo. 2012.
- VASCONCELLOS, Pedro Ivo Guimarães de; ROSENTHAL Ruben; PARANHOS, Ronaldo Pinheiro da Rocha; **Estudo da soldagem de tubos de aço inoxidável dúplex e superduplex na posição 5G**; Soldagem inspeção; vol.15; no.3; São Paulo July/Sept.; 2010; 191-199. Phelan, D. & Dippenaar, R. (2004); Widmanstätten ferrite plate formation in low-carbon steels; Metallurgical and Materials Transactions A - Physical Metallurgy and Materials Science.