

PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS MORFOLÓGICAS EM CAVACOS PRODUZIDOS EM PROCESSO DE TORNEAMENTO DA LIGA AÇO SAE 182 F22

¹Mauro Fiel do Valle Júnior, ²Gabriel Augusto do Prado Raymundo, ²Alexandre Honorato Muella Peixoto, Lucas Gabriel Cruz dos Santos ¹Emerson Augusto Raymundo

FATEC de Pindamonhangaba, Rodovia Vereador Abel
Fabrício Dias, 4010, Água Preta – Pindamonhangaba/SP
122445-010, Brasil, maurofieljr@hotmail.com, gabriel.raymundo@fatec.sp.gov.br,
alexandre.peixoto01@fatec.sp.gov.br, lucasgs318@gmail.com, emerson.raymundo2@fatec.sp.gov.br

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo de torneamento por acabamento em aço ARBL, com foco na análise morfológica e estereológica dos cavacos gerados. Para isso, empregou-se o processamento digital de imagens como ferramenta de avaliação das diferentes regiões do cavaco central, intermediária, de fluxo e rugosa visando compreender sua evolução em função das forças de corte e das condições térmicas. Os resultados indicaram que a região central apresentou menor quantidade de perlita, associada à migração dessa fase para as zonas de fluxo e rugosa, enquanto a região intermediária exibiu maior densidade de partículas, possivelmente decorrente de recristalização pelo calor dissipado. A zona de fluxo revelou perímetros menores da perlita, evidenciando efeitos de encruamento cisalhante, ao passo que a região rugosa apresentou maior comprimento de fases, atribuídos à ação combinada de forças cisalhantes e à dissipação térmica. A análise também demonstrou que a segmentação dos cavacos está associada à nucleação de trincas internas e à redistribuição microestrutural durante o corte, corroborando a teoria da formação de zonas de fluxo. Verificou-se que os parâmetros de usinagem empregados pela empresa foram adequados ao material estudado. Conclui-se que o processamento digital de imagens é uma ferramenta de grande potencial para o monitoramento da usinagem, possibilitando correlacionar microestrutura e comportamento dos cavacos, ampliar a compreensão dos mecanismos de formação e auxiliar na escolha otimizada de ferramentas, parâmetros de corte e estratégias de refrigeração no setor metal-mecânico.

Palavras-chave: Torneamento. Cavacos. Processamento e Análise de Imagens.

Área do Conhecimento: (Engenharias de Materiais e Metalúrgica e Engenharia Mecânica).

Introdução

Segundo Ferrarese (1977), os estudos experimentais são fundamentais para compreender fenômenos complexos que não podem ser explicados apenas por modelos teóricos simplificados, como ocorre na teoria da plasticidade aplicada à usinagem. A teoria da plasticidade, embora essencial, não consegue prever de forma satisfatória os fenômenos dinâmicos observados durante o processo de formação de cavacos, em que as velocidades de deformação e os gradientes de tensão envolvidos são significativamente elevados. Dessa forma, a experimentação torna-se indispensável para avaliar variáveis de difícil previsão analítica, como o desgaste progressivo da ferramenta, a formação da aresta postiça de corte, a geração e dissipação de calor, além da influência direta dos parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) no desempenho do processo (DINIZ, 2000).

No âmbito dos materiais empregados nesses processos, os aços-carbono ocupam posição central. Sua classificação depende do teor de carbono presente na liga, variando de baixo (até 0,30%), médio (0,30% a 0,60%) e alto carbono (0,60% a 1,00%). Esses aços apresentam propriedades mecânicas sensíveis não apenas ao teor de carbono, mas também aos elementos residuais e à aplicação de

tratamentos térmicos específicos (CALLISTER, 2002). Com a evolução tecnológica, aumentou o interesse em ligas de alta resistência e baixa liga (ARBLs), que aliam tenacidade e resistência mecânica, permitindo seu uso em condições extremas, como em estruturas offshore e componentes sujeitos a elevadas pressões e temperaturas. Um exemplo emblemático é o aço ASTM A182 F22, amplamente empregado em válvulas, flanges, cabeças de poço e conectores da indústria petrolífera, submetidos a rigorosos requisitos de desempenho (GARCIA et al., 2019; DANTAS et al., 2006). Para tais aplicações, esses aços passam por processos de forjamento e normalização cuidadosamente controlados, visando a obtenção de microestruturas refinadas, com grãos uniformes e propriedades mecânicas adequadas ao serviço em campo. A caracterização dessas microestruturas, antes realizada apenas por inspeção visual e análise qualitativa em microscopia óptica ou eletrônica, passou a contar com ferramentas computacionais cada vez mais sofisticadas. Nesse sentido, o processamento e a análise de imagens digitais têm assumido papel estratégico, fornecendo subsídios objetivos para a compreensão do comportamento mecânico e estrutural dos materiais. Técnicas de segmentação permitem distinguir diferentes fases metalúrgicas, identificar inclusões não metálicas e mensurar o tamanho médio de grão com maior reprodutibilidade e precisão em comparação aos métodos tradicionais manuais.

Conforme ressaltam Spring e Inoué (1997), operações em imagens digitais podem ser classificadas em simples manipulações pontuais de pixels, nas quais cada valor depende apenas de sua intensidade original, ou em operações de vizinhança, onde o valor final de cada pixel resulta da interação com seus vizinhos adjacentes. Esse princípio é fundamental para o desenvolvimento de filtros de suavização, realce de bordas e técnicas de convolução, largamente empregados no estudo metalográfico. Mais recentemente, o avanço da visão computacional e da inteligência artificial ampliou ainda mais as possibilidades do processamento de imagens na engenharia de materiais (GONZALEZ; WOODS, 2018). Essa integração entre metalurgia e ciência de dados representa um caminho promissor para acelerar o desenvolvimento de novos materiais, reduzir custos experimentais e aumentar a confiabilidade dos processos de caracterização.

Metodologia

O material utilizado neste estudo foi fornecido por uma empresa do setor de equipamentos destinados à exploração de petróleo, segmento que demanda componentes de elevada confiabilidade estrutural, resistência mecânica e durabilidade em ambientes severos. O aço investigado corresponde ao SAE 182 F22, classificado como um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). Essa classe de materiais é reconhecida por apresentar um balanço otimizado entre resistência mecânica, tenacidade e soldabilidade, atributos essenciais para sua aplicação em estruturas críticas da indústria de petróleo e gás. A liga F22 é caracterizada pela presença de cromo (Cr) e molibdênio (Mo) como elementos de liga principais. O cromo contribui para a resistência à oxidação e à corrosão em meios agressivos, enquanto o molibdênio atua na melhora da resistência à fluência e no aumento da estabilidade térmica, reduzindo a suscetibilidade ao amolecimento em temperaturas elevadas. Essas propriedades tornam o aço F22 especialmente adequado para a fabricação de componentes submetidos a altas pressões e temperaturas, tais como válvulas, cabeçotes, conexões e segmentos de tubulação empregados em operações de extração, refino e transporte de petróleo. Além disso, o comportamento metalúrgico da liga garante boa resposta a tratamentos térmicos, possibilitando ajustes direcionados de dureza, tenacidade e microestrutura de acordo com os requisitos da aplicação final.

O processo de usinagem adotado foi o torneamento, realizado com o uso de uma ferramenta de corte de metal duro. A pastilha selecionada corresponde ao código ISO CNMG 90612, Classe KCP25C, desenvolvida para a usinagem de materiais de dureza intermediária. Essa classe é recoberta por um revestimento multicamadas que favorece a resistência ao desgaste abrasivo e difusional, além de apresentar boa estabilidade térmica e elevada resistência ao entalhe, fatores que contribuem para maior vida útil da aresta de corte e maior consistência no desempenho em operações contínuas. A geometria da pastilha, de corte balanceado, foi escolhida de forma a permitir adequada formação do cavaco e redução das forças de usinagem, aspectos relevantes para a avaliação microestrutural subsequente. As operações foram conduzidas em um torno vertical CNC multitarefas, modelo Giddings & Lewis VTC 2500, equipamento projetado para usinagem de peças de grande porte. Este modelo se destaca pela robustez estrutural, elevada rigidez dinâmica e precisão dimensional, sendo amplamente empregado nos setores de energia e petróleo. Sua capacidade multitarefas possibilita a execução de

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

operações de desbaste e acabamento com alto nível de repetibilidade, assegurando condições estáveis para a geração e coleta dos cavacos. Os parâmetros de corte foram definidos considerando as características geométricas da peça, propriedades do material e limitações da ferramenta, de modo a garantir condições representativas do processo industrial. Os valores estabelecidos, fundamentais para correlacionar o comportamento de usinagem com as transformações microestruturais dos cavacos, encontram-se organizados na Tabela 2, apresentada na sequência. Esses dados servirão como referência para a análise comparativa entre a resposta metalúrgica do material e o desempenho da ferramenta durante o torneamento.

Tabela 2 - Parâmetros de usinagem utilizados.

Parâmetros de corte	Velocidade (m/min)	Avanço (mm)	Profundidade usinagem (mm)	Rotação (rpm)
Valores	100	0.5	5 mm	30

Fonte: Autores

Os cavacos gerados durante o processo de usinagem foram coletados diretamente na operação de torneamento e, em seguida, classificados quanto à forma geométrica e ao tipo, de acordo com os critérios de usinabilidade estabelecidos na literatura técnica. Essa classificação preliminar permitiu correlacionar a morfologia dos cavacos com os parâmetros de corte e com as características metalúrgicas do material. Para aprofundar a caracterização, empregou-se a metalografia como técnica auxiliar, com o objetivo de identificar as transformações microestruturais decorrentes do processo de formação do cavaco. Amostras representativas foram submetidas ao processo de embutimento a quente, conduzido no Laboratório de Metalografia da FATEC de Pindamonhangaba-SP, seguindo normas e procedimentos convencionais de preparação metalográfica.

Após o embutimento, os cavacos foram submetidos a lixamento e polimento progressivos, utilizando abrasivos de granulometrias sucessivas, de forma a eliminar deformações superficiais introduzidas nas etapas anteriores. Em seguida, foi realizado o ataque químico com solução de nital a 3%, visando a revelação das fases constituintes e a evidência das modificações microestruturais induzidas pela deformação plástica intensa durante o processo de usinagem. As análises subsequentes foram conduzidas em microscópio óptico metalográfico, possibilitando a obtenção de micrografias representativas para avaliação qualitativa e quantitativa.

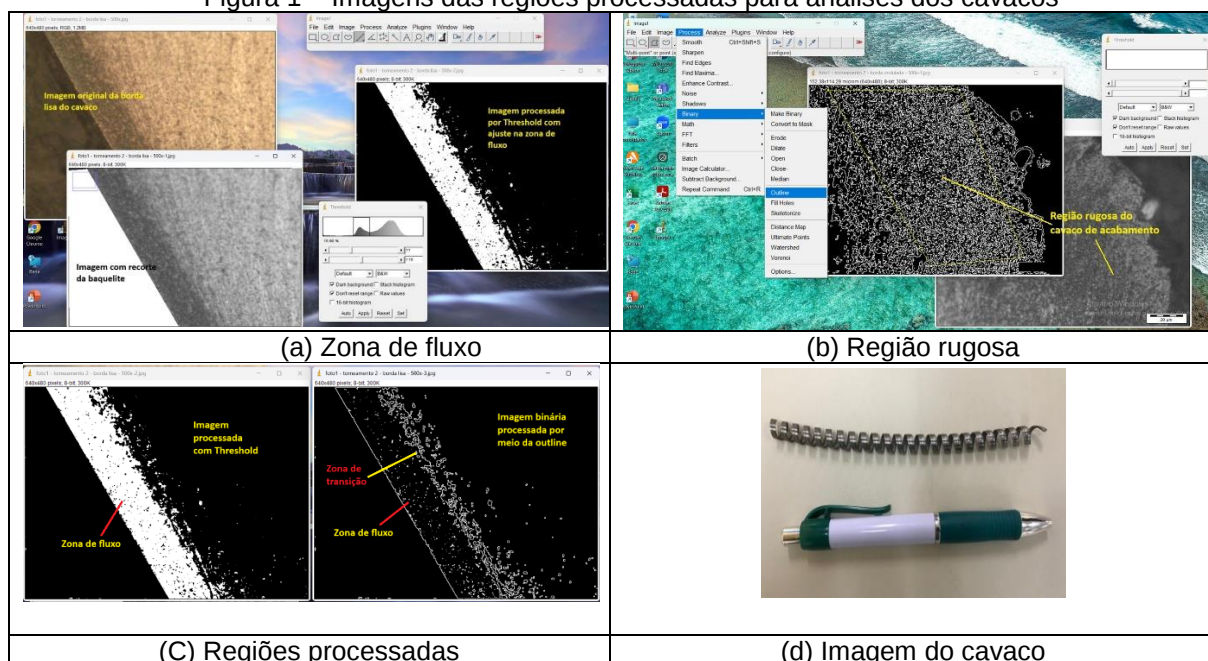
Considerando que a teoria clássica de formação de cavacos não contempla de forma detalhada a morfologia resultante nem a existência de regiões distintas no cavaco como a zona de fluxo e a região rugosa formada após o recalque, adotou-se como recurso complementar o uso do software de domínio público "ImageJ". Esse programa possibilitou a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens para quantificar parâmetros microestruturais e morfológicos. A utilização do "ImageJ" foi motivada por estudos recentes que sugerem que os cavacos podem apresentar zonas diferenciadas de deformação, bem como alterações de fases metalúrgicas que não são contempladas em modelos teóricos simplificados. A rotina de processamento de imagens foi desenvolvida pelo pesquisador com base em experiências prévias e em protocolos aplicados em análises metalográficas. O fluxo de processamento seguiu as etapas:

- Abertura da imagem no software e calibração da escala, convertendo pixels em unidades micrométricas, conforme a barra de referência da micrografia;
- Conversão da imagem para 8 bits, otimizando o contraste para posterior segmentação;
- Aplicação do *Threshold*, ajustando o histograma de intensidade de frequência para realce das regiões de interesse;
- Processamento binário pelo recurso *Outline*, permitindo o realce e a delimitação dos contornos das fases;
- Seleção das regiões de análise e extração dos parâmetros quantitativos por meio da ferramenta "Analyze Particles".

Os parâmetros avaliados compreenderam área, perímetro, média e desvio-padrão, permitindo uma análise estatística consistente das variações microestruturais e estereológicas. A partir dessa

metodologia, foi possível identificar e discutir evidências relacionadas à formação da zona de fluxo, à presença de fases intermediárias, à migração e à dispersão de fases, bem como às modificações estereológicas decorrentes do processo de usinagem. Esses aspectos exercem influência direta não apenas no mecanismo de formação do cavaco, mas também no desgaste da ferramenta de corte e na qualidade superficial da peça usinada, considerando que os cavacos foram coletados especificamente durante a etapa de acabamento do aço F22. As imagens (a), (b) e (c) da Figura 1, apresentadas a seguir, ilustram o processamento realizado e destacam as regiões analisadas nos cavacos.

Figura 1 – Imagens das regiões processadas para análises dos cavacos

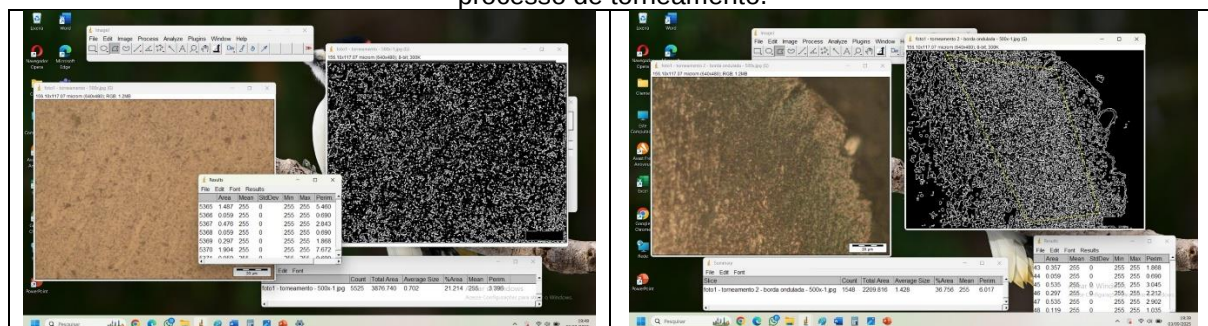


Fonte: Autores

Resultados

As imagens apresentadas a seguir evidenciam a aplicação da metodologia proposta, na qual foram processadas e analisadas micrografias da peça no estado como recebido e das diferentes regiões dos cavacos. Para as discussões, consideraram-se os valores de perímetro das partículas ou fases presentes. Neste estudo, foi analisado o microconstituente perlítico, sendo o material constituído de perlita, com matriz de austenita como fundo. As medidas de perímetros das regiões perlíticas obtidas por meio do processamento das imagens foram, respectivamente: 3,39 para o material como recebido, 6,6 para a região rugosa, 2,6 para a zona de fluxo, 8,9 para a zona intermediária e, por fim, 4,4 para a região central.

Figura 2- Imagens da macro criada para o processamento da amostra como recebida e do cavaco do processo de torneamento.





Fonte: Autores

Discussão

O processo de torneamento por acabamento foi selecionado devido à sua maior relevância em relação aos custos de produção. Nesse caso, os cavacos apresentam interação significativa com a saída da ferramenta, sendo a influência da temperatura particularmente evidente em função da maior velocidade de usinagem. As imagens apresentadas, mesmo sem processamento inicial, já indicaram alterações morfológicas nas diferentes regiões do cavaco, como a zona de fluxo, a região intermediária, a região central e a região rugosa. Para que os cavacos sejam corretamente analisados, é necessário que apresentem espessura suficiente e que completem o mecanismo de formação característico: recalque do material, evolução do recalque sob a ação da força de corte, deslocamento sobre a face da ferramenta e, por fim, a fragmentação do cavaco em função da dureza da liga. No caso do processo estudado, o tipo e a forma dos cavacos mostraram-se coerentes, considerando tratar-se de um aço ARBL, que tende a gerar cavacos dúcteis do tipo cisalhante, em forma de hélice ou helicoidal. Esse comportamento pôde ser observado na Figura 1(d), confirmando a adequação dos parâmetros de usinagem utilizados pela empresa.

As imagens processadas revelaram, inicialmente, que a amostra como recebida apresentou valores próximos aos obtidos para a zona interna dos cavacos, indicando que a região central não sofreu evolução significativa. Além disso, observou-se uma menor quantidade de partículas nessa região, fato atribuído à diminuição da fração perlítica, possivelmente devido à sua migração para as zonas de fluxo e rugosa em função da pressão exercida e do aumento de temperatura durante a formação do cavaco. Outro aspecto observado foi que o perímetro médio das partículas na zona de fluxo apresentou-se inferior ao do material como recebido. Essa redução pode estar associada ao encruamento cisalhante próximo à saída da ferramenta, o que tende a reduzir o perímetro das fases perlíticas. Já a região intermediária, localizada entre a zona de fluxo e a região central, apresentou valores de perímetro significativamente maiores. Tal comportamento pode estar relacionado à interação das forças cisalhantes atuantes no recalque, ao deslocamento do material e às forças de arraste, que contribuem para o alongamento das fases. Nessa região, também foi registrada maior densidade de partículas, o que pode estar associado à recristalização favorecida pela dissipação térmica mais intensa.

Por fim, a região rugosa apresentou valores de perímetro ligeiramente superiores aos das regiões central, de fluxo e do material como recebido. Esse resultado pode estar relacionado às forças

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

cisalhantes combinadas à dissipação do calor para o meio ambiente. Para uma análise mais aprofundada, seria relevante investigar a orientação dos grãos em função dos módulos de força atuantes, considerando possíveis efeitos cíclicos ou de revolução característicos da região rugosa dos cavacos.

Conclusão

O presente trabalho demonstrou, por meio da aplicação do processamento digital de imagens, a possibilidade de identificar diferenças morfológicas e estereológicas das fases e compreender sua evolução em função das forças atuantes no processo de usinagem. Observou-se que a região de fluxo apresentou partículas perlíticas com menores perímetros, corroborando a teoria sobre a formação dessas zonas. Além disso, verificou-se a evolução da perlita nas diferentes regiões do cavaco, destacando-se a central e a de fluxo, cujo comportamento peculiar pode estar associado ao mecanismo de fratura observado. Esse fenômeno foi caracterizado pela nucleação de trincas internas intensas, culminando na segmentação ou quebra final dos cavacos.

Embora os resultados obtidos tenham sido relevantes, torna-se necessário ampliar o número de análises e avaliar cavacos de diferentes regiões da peça para consolidar as discussões apresentadas. Sugere-se, para trabalhos futuros, a utilização da transformada rápida de Fourier, que pode auxiliar na determinação da orientação das partículas, na análise da distribuição de perímetros e na aplicação de filtros para reduzir ruídos e aumentar a precisão dos resultados. Outra perspectiva promissora refere-se ao uso de simulações por elementos finitos, capazes de fornecer informações adicionais sobre os mecanismos de formação dos cavacos e sobre a influência bidimensional e tridimensional das forças nos deslocamentos das fases.

Assim, este estudo contribui para a compreensão dos parâmetros de usinagem aplicados ao aço F22, oferecendo subsídios que podem auxiliar na escolha de ferramentas de corte com geometrias adequadas ao controle da quebra do cavaco, bem como no aperfeiçoamento das estratégias de refrigeração. Ressalta-se, ainda, que os resultados indicam que a empresa em questão já adota parâmetros adequados para a operação de torneamento por acabamento. Nesse contexto, o uso do processamento digital de imagens mostra-se uma ferramenta com grande potencial de integração aos processos produtivos, permitindo avanços na otimização e no gerenciamento da usinagem, etapa de elevada relevância para o setor metal-mecânico.

Referências

- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 751 p.
- CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p
- Diniz, A.E. Marcondes, F. C, Coppini, N.L., **Tecnologia da Usinagem dos Metais**, Editora Art. Liber, São Paulo, 2000.
- GARCIA, A. et al. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unicamp, 2019.
- DANTAS, A. B. et al. **Materiais para aplicações em ambientes agressivos: o aço ASTM A182 F22**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, p. 157-166, 2006.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2018.
- Spring, K., Inoué, S., **Video microscopy the fundamentals**. 2nd. ed. New York: Plenum Press, 1997.
- Ramos Pinto, e Renner Washington Mariano dos Santos.